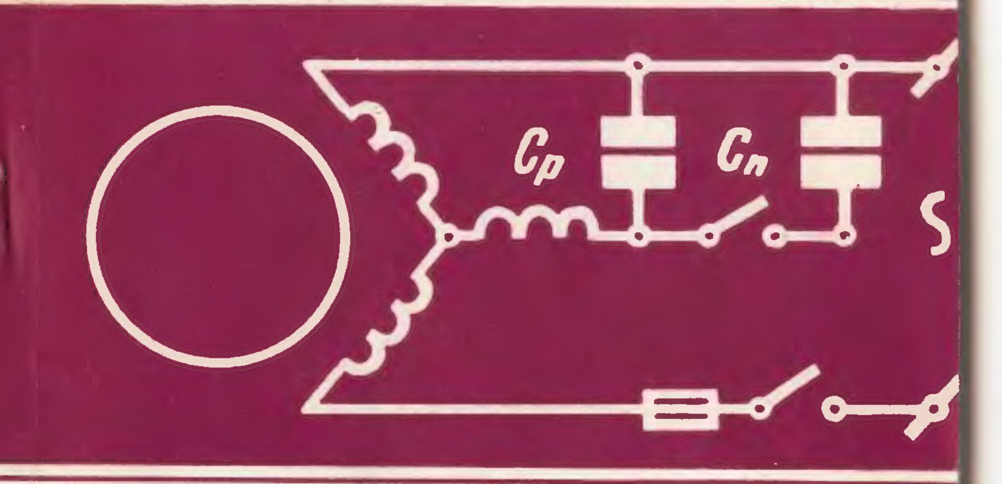


С. П. Фурсов

Использование трехфазных электродвигателей в быту

Издательство «Картя Молдовеняскэ»
Кишинев * 1976

С. П. Фурсов

Использование трехфазных электродвигателей в быту

Издание II, дополненное

Уважаемому
Александру Александровичу
Бикорюкову
С. Фурсов
05.06.76 г.
г. Кишинев

Издательство «Картя Молдовеняскэ»
Кишинев * 1976

6С9.8
Ф95

УКД 621. 313.333.2

В брошюре кандидата технических наук С. П. Фурсова, написанной в популярной форме, даны краткие исторические сведения рассмотрены вопросы, связанные с получением вращающегося магнитного поля и вращающегося момента двигателя, увеличением коэффициента его мощности. Анализируются рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя, его работа при пониженном напряжении и ассиметрии трехфазного питающего напряжения. Приводятся различные электрические схемы включения трехфазных асинхронных двигателей в однофазную сеть, упрощенная методика расчета, справочные и опытные данные.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, знакомых с электротехникой в объеме средней школы.

Ф $\frac{30306-033}{М751(12)-76}$ 148—76

НЕМНОГО ИСТОРИИ

До середины 70-х годов XIX века электротехника была почти исключительно техникой постоянного тока (телеграфия, сигнализация, гальванопластика и т. д.). К этому времени относятся два изобретения, положившие начало использованию электротехники в промышленности. Это электрическая машина — генератор с самовозбуждением, экономичный источник электроэнергии и электрическая свеча — надежный источник света, получивший сразу же массовое применение. Электрические машины и свечи, электроарматура и провода стали основными предметами производства первых электротехнических предприятий. Широкое распространение получили лампы накаливания (1881 г.). В результате борьбы между сторонниками постоянного и переменного токов выявились не только значительные преимущества последнего (возможность трансформации и передачи на значительные расстояния), но и его существенные недостатки (отсутствие необходимого двигателя переменного тока, удовлетворяющего запросам промышленности и т. д.). Сфера применения переменного тока ограничивалась освещением. Все известные до того времени электродвигатели переменного тока не начинали вращаться под нагрузкой и останавливались при незначительных перегрузках. Они не были пригодны для практических целей.

Разработка необходимого промышленности двигателя переменного тока, ставшего теперь основным потребителем электроэнергии, началась с 1824 года, когда француз Доменик Араго открыл явление электромагнитного вращения.

Объяснить явление, открытое Араго, стало возмож-

ным только после открытия английским ученым Майклом Фарадеем в 1831 году электромагнитной индукции. Араго установил, что проводящее тело может совершать механическую работу, если его поместить во вращающееся магнитное поле, полученное при вращении постоянного магнита. Некоторые исследователи, в том числе Уолтер Бейли, Марсель Депре, Элиу Тампсон, были близки к открытию явления вращающегося магнитного поля в современном его понимании. Так, Э. Тампсон отмечал: «Трудно составить такую комбинацию из электромагнитов, обмотки которых обтекаются переменным током, и кусков меди, которая не имела бы тенденции к вращению». Однако никто из них не мог в ясной и строгой форме объяснить существо явления вращающегося поля, создаваемого переменным током. В 1888 году независимо друг от друга это явление описали итальянский физик Галлилео Феррарис и югославский изобретатель Никола Тесла. Феррарис и Тесла показали, что если две катушки, расположенные под прямым углом друг к другу, питать двумя равными переменными синусоидальными токами, отличающимися друг от друга только по фазе на 90°, то вектор суммарной магнитной индукции в точке пересечения катушек получает равномерное вращательное движение, не изменяясь по абсолютной величине и тем самым ничем не отличаясь от вращающегося магнитного поля, получаемого с помощью вращающегося постоянного магнита. Феррарис построил небольшой двухфазный электродвигатель мощностью около 3 Вт. Для получения двухфазной системы из однофазной он использовал искусственный сдвиг фаз с помощью дополнительного индуктивного сопротивления в одной из катушек. В результате математического исследования, основанного на ошибочных начальных условиях, Феррарис пришел к выводу, что двигатель, построенный на основе использования свойств вращающегося поля, не может иметь к. п. д. больше 50% (теоретически, а практически еще меньше).

Естественно, что столь низкий к. п. д. не мог удовлетворить электриков-практиков, поэтому интерес к работам Феррариса заметно ослабел. Никола Тесла, добившийся значительных успехов и получивший в 1888 году патент на электродвигатель многофазного тока, построил двухфазный асинхронный двигатель с явными полюсами и концентрированной обмоткой и двухфазный генератор для его питания. Эти двигатели имели очень большое магнитное рассеяние и, как выяснилось позже, неблагоприятное распределение намагничивающей силы вдоль воздушного зазора. Тесла применил трехпроводную систему двухфазного тока. При этом расход меди на провода увеличился примерно в 1,5 раза по сравнению с однофазной системой. Американская фирма «Вестингауз», в которой работал Тесла, осуществила несколько установок по его разработкам. Однако недостатки системы двухфазного тока сдерживали ее внедрение в практику.

В 1890 году французские электрики Южен и Леблан сконструировали электродвигатель, сдвиг токов статора которого осуществлялся при помощи конденсатора. Это был первый конденсаторный двигатель.

В то время как в Америке пытались усовершенствовать систему двухфазного переменного тока, в Европе была разработана более совершенная электрическая система трехфазного переменного тока, на применении которой основана вся современная электрификация. Основоположником техники трехфазного переменного тока стал русский изобретатель и инженер Михаил Осипович Доливо-Добровольский. Он писал о себе: «...увлеченный статьей Феррариса, начал свои самостоятельные работы в этой области... Феррарис, правда, упомянул, что принцип вращающегося поля может быть применен для электродвигателей, но сразу же аннулировал свои выводы посредством расчета, согласно которому такие электродвигатели смогут иметь высший теоретический к. п. д. 50% (практически же не более 40%). Его ошибка заключалась в том, что он искал максимальную мощность, которая получалась как раз при 50% скольжения.

Это был такой же метод расчета, который при вычислении максимальной мощности батареи приводит к равенству внешнего и внутреннего сопротивлений...

Немедленно после появления публикаций Феррариса в журналах мне пришла на ум эта аналогия. Я тотчас же сказал себе, что если сделать вращающееся поле по методу Феррариса и поместить в него такой короткозамкнутый якорь малого сопротивления, то этот якорь скорее сам сгорит, чем будет вращаться с небольшим числом оборотов. Во всяком случае он должен будет при

весьма малой относительной скорости вращения развивать громадную силу. Мысленно я прямо представил себе электродвигатель многофазного тока с ничтожным скольжением... Мне был поэтому совершенно понятен высокий к. п. д., несмотря на авторитет и математические выкладки Феррариса»*.

Многочисленные опыты в этом направлении позволили Доливо-Добровольскому создать трехфазную электрическую систему и разработать совершенную, не изменившуюся в принципе до наших дней, конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя — основного двигателя современной промышленности. Доливо-Добровольский показал, что при активной нагрузке на три провода трехфазной линии, при прочих равных условиях, требовалось меди меньше (на 25%), чем на два провода однофазной системы. Это в значительной степени способствовало решению вопроса о выборе системы тока в пользу трехфазной.

В конструкции двигателя Доливо-Добровольский отказался от явных полюсов, а обмотку распределил по всей окружности статора. Это значительно уменьшило магнитное рассеяние по сравнению с двигателями Тесла. Доливо-Добровольский изобрел ротор с короткозамкнутой обмоткой в виде беличьей клетки и фазный ротор. Он указал два основных способа соединения обмоток: в звезду и в треугольник. Им изобретены трехфазный трансформатор и трехфазный автотрансформатор. В 1890 году Доливо-Добровольский разработал четырехпроводную систему трехфазного тока (три линейных провода и один нулевой). По его проекту построена первая в мире трехфазная линия электропередачи Лауффен — Франкфурт-на-Майне длиной 170 км, линейным напряжением 15000 В. По этой линии с к. п. д. 75% была передана мощность 300 л. с., приемниками электроэнергии были один электродвигатель переменного тока мощностью 100 л. с. и 1000 ламп накаливания.

Франкфуртская выставка 1891 года и международный электротехнический конгресс, проходивший на территории выставки, данными науки и опыта решительно сломили упорство тех, кто тормозил развитие техники

* М. О. Доливо-Добровольский. Избранные труды (о трехфазном токе). М.—Л., Госэнергоиздат, 1948.

переменного тока. Спрос на электрическую энергию неимоверно возрос. Фирма «Вестингауз», владевшая патентами Тесла, вынуждена была постепенно перейти на трехфазный ток. Первым предприятием в России, электрифицированным в 1893 году трехфазным переменным током, был Новороссийский элеватор. Общая мощность электростанции — 1200 кВт. В то время это была самая мощная в мире электростанция, питавшая электродвигатели элеватора мощностью 3,5—15 кВт. Она использовалась для освещения дуговыми лампами и лампами накаливания.

Факт сооружения мощной и совершенной установки трехфазного тока спустя всего 2 года после публичной демонстрации системы трехфазного тока свидетельствовал, что в России имелись достаточные инженерно-технические силы, которые могли обеспечить технический прогресс страны. Однако порочная политика царского чиновничьего аппарата тормозила развитие отечественной электротехники и электропромышленности.

Мощность всех электростанций России в 1913 году составила 1 098 000 кВт. По производству энергии на душу населения Россия была на 15-м месте в мире (8 кВт-ч в год).

Большой ущерб и без того слабой энергетике и промышленности России нанесли войны — первая мировая 1914—1918 гг. и гражданская.

Широкое строительство электростанций распределительных сетей, линий электропередач, электрических машин и аппаратов началось после Великой Октябрьской социалистической революции. По инициативе В. И. Ленина в 1917 году была создана комиссия для разработки плана электрификации страны. В 1920 году (22 декабря) на VIII Всероссийском съезде Советов был принят государственный план электрификации России — ГОЭЛРО.

Тогда же с трибуны прозвучала историческая ленинская формула «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны». План ГОЭЛРО предусматривал постройку 30 районных электростанций общей мощностью 1 750 000 кВт, что почти в два раза больше мощности электростанций 1913 года.

В 1930 году план ГОЭЛРО был перевыполнен, к 1935 году было выполнено почти 3 плана ГОЭЛРО, в 1955 году годовой энергобаланс нашей страны превзо-

шел задание плана ГОЭЛРО почти в 20 раз. Таков путь молодой советской энергетики. По производству электроэнергии Советский Союз занимает сейчас второе место в мире и первое в Европе. Общее производство электрической энергии в нашей стране составило в 1975 году 1 065 млрд. кВт-ч (план).

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Асинхронным* называют электродвигатель переменного тока, у которого скорость вращения ротора, зависящая от нагрузки двигателя, меньше скорости вращения магнитного поля статора. Принцип действия асинхронного двигателя основан на практическом использовании явления вращающегося магнитного поля статора, в результате взаимодействия которого с токами в обмотке ротора создается вращающий момент, движущий ротор в сторону вращения магнитного поля, но с несколько меньшей скоростью. Вращающееся магнитное поле может быть получено путем вращения постоянного магнита или электромагнита. В асинхронном двигателе для получения вращающегося магнитного поля используют обмотки, по которым протекает переменный синусоидальный ток.

Магнитное поле статора вращается со скоростью, выраженной формулой

$$n_c = \frac{60f}{P}, \qquad (1)$$

где n — частота вращения (скорость вращения магнитного поля — синхронная скорость), об/мин; f — частота переменного тока питающей сети, Гц или пер/с; P — число пар полюсов.

Поскольку частота переменного тока обычно равна 50 Гц (промышленная частота), формула (1) упрощается:

$$n = \frac{3000}{P}. \qquad (2)$$

* Греческое α — не и σιγχρογω — синхронный, идущий в такт.

Частота вращения ротора асинхронного двигател меньше скорости вращения магнитного поля:

$$n < n_c.$$

Скорость вращения ротора относительно вращаю щегося магнитного поля равна разности

$$n_c - n.$$

Скольжение (относительная скорость) выражаетс формулой

$$S = \frac{n_c - n}{n_c}, \quad (3$$

где n_c — частота вращения магнитного поля статора об/мин; n — частота вращения ротора, об/мин,

Часто скольжение выражается в процентах:

$$S\,\% = \frac{n_c - n}{n_c} \cdot 100. \quad (4$$

При неподвижном роторе $S = 1$, или 100%; при но минальной нагрузке у двигателей небольшой мощност $S = 0{,}03 \div 0{,}06$, или 3 — 6%, а у двигателей большо мощности $S = 0{,}01 \div 0{,}03$, или 1 — 3 %.

Используя формулу (3), частоту (скорость) вращени ротора можно выразить:

$$n = n_c\,(1 - S). \quad (5$$

Вращающееся магнитное поле наводит в обмотке ро тора э. д. с., которые создают ток ротора. Частота тока в обмотке ротора пропорциональна скольжению:

$$f_2 = S \cdot f_1, \quad (6$$

где f_1—частота переменного тока в обмотке статора, f_2— частота переменного тока в обмотке ротора.

Статор асинхронного двигателя (неподвижная часть) изготовляется из отдельных листов специальной стали В его пазах расположены обмотки, сбоку к нему при крепляются подшипниковые крышки, а внутри находит ся ротор (вращающаяся часть). Ротор состоит из вала с напресованным на нем пакетом стали в форме ци линдра, в пазах которого расположена обмотка. Част

на роторе используется короткозамкнутая обмотка типа беличьей клетки, выполненная из медных стержней, соединенных между собой медными кольцами; обмотку ротора изготовляют и путем заливки его расплавленным алюминием, при этом одновременно отливаются и короткозамыкающие кольца.

В некоторых машинах на роторе делают обмотку, аналогичную обмотке статора, выводы которой присоединяют к контактным кольцам. Такой двигатель называют асинхронным двигателем с контактными кольцами или с фазным ротором. К контактным кольцам присоединяют пусковой реостат (а иногда и регулировочный). Двигатель же, у которого на роторе находится короткозамкнутая обмотка, называют асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. На практике используют оба типа двигателей, но электродвигатели с короткозамкнутым ротором используют чаще, особенно при небольших мощностях. Иногда применяют сплошной массивный ротор.

Двухфазное вращающееся магнитное поле

С помощью двух переменных токов одинаковой амплитуды и частоты, но сдвинутых по фазе на угол 90°, можно получить вращающееся магнитное поле:

$$i_1 = I_m \sin \omega t, \quad (7)$$

$$i_2 = I_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90°), \quad (8)$$

где i_1 — мгновенное значение тока в одной обмотке статора; I_m — амплитудное значение тока в этой же обмотке; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, i_2 — мгновенное значение тока во второй обмотке.

Для этого возьмем две одинаковые катушки и расположим их так, чтобы оси катушек были сдвинуты в пространстве на угол 90° (рис. 1).

Каждый ток, проходя по виткам катушки, создает пульсирующее магнитное поле, изменяющееся по величине и неподвижное в пространстве. Ток I_1 создает магнитную индукцию b_1 по оси первой катушки; ток I_2 — магнитную индукцию b_2 по оси второй катушки. Определим вектор результирующей магнитной индукции B в

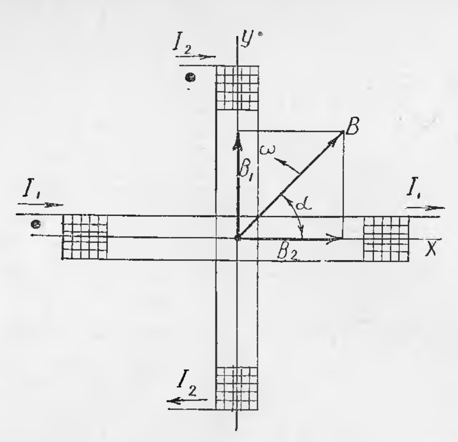


Рис. 1. Расположение двух неподвижных катушек для получения вращающегося магнитного поля

точке пересечения осей обеих катушек. Отдельные слагаемые магнитной индукции каждой катушки пропорциональны соответствующим токам и совпадают с ними по фазе:

$$b_1 = B_m \cdot \sin \omega t, \tag{9}$$

$$b_2 = B_m \cdot \cos \omega t = B_m \sin (\omega t + 90^\circ). \tag{10}$$

Результирующая магнитная индукция:

$$B = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m. \tag{11}$$

Абсолютная величина вектора результирующей магнитной индукции постоянна (не зависит от времени) и равна амплитуде магнитной индукции отдельной катушки. Однако положение в пространстве изменяется:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b_1}{b_2} = \frac{B_m \cdot \sin \omega t}{B_m \cdot \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t, \tag{12}$$

откуда

$$\alpha = \omega t. \tag{13}$$

Результирующий вектор магнитной индукции вращается, таким образом, против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью и за один период совершает полный оборот. Его конец описывает окружность (круговое магнитное поле).

Вращающееся магнитное поле, полученное с помощью двух переменных токов и двух катушек, ничем не отличается от вращающегося магнитного поля, получаемого путем вращения постоянного магнита или электромагнита. Если амплитуды токов и число витков в катушках разные, а сдвиг фаз по времени и в пространстве больше или меньше 90°, то вместо кругового вращающегося поля будет эллиптическое вращающееся поле (результирующий вектор магнитной индукции в этом случае изменяется по величине). Для работы асинхронного двигателя круговое поле лучше эллиптического, поэтому принимаются все меры, чтобы получить круговое поле. Чтобы изменить направление вращения магнитного поля, нужно изменить направление тока в одной из катушек (только в одной), например в первой, тогда:

$$b_1 = -B_m \sin \omega t,$$
$$b_2 = B_m \cos \omega t,$$
$$\operatorname{tg} \alpha = -\operatorname{tg} \omega t \text{ и } \alpha = -\omega t.$$

Трехфазное вращающееся магнитное поле

С помощью трех переменных токов одинаковой амплитуды и частоты, но сдвинутых относительно друг друга на угол 120°, и системы трех одинаковых катушек, соединенных в звезду или в треугольник и расположенных таким образом, чтобы оси катушек в пространстве были сдвинуты на 120°, можно получить вращающееся магнитное поле (рис. 2).

$$i_1 = I_m \sin \omega t, \qquad b_1 = B_m \sin \omega t,$$
$$i_2 = I_m \sin (\omega t - 120^\circ), \qquad b_2 = B_m \sin (\omega t - 120^\circ),$$
$$i_3 = I_m \sin (\omega t - 240^\circ), \qquad b_3 = B_m \sin (\omega t - 240^\circ).$$

Чтобы найти результирующий вектор магнитного поля, определим суммы проекций векторов магнитных индукций каждой катушки на две взаимно-перпендикулярные оси x и y.

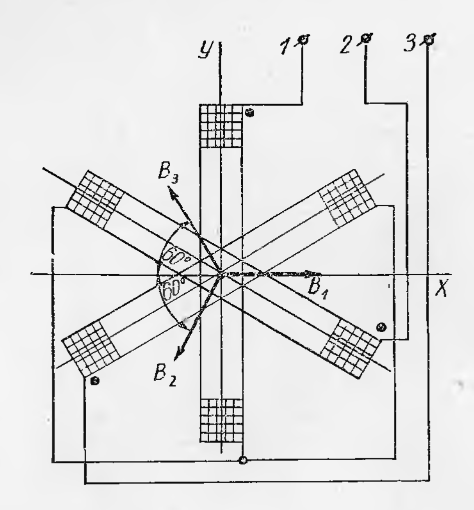


Рис. 2. Расположение трех катушек, включенных в звезду, для п лучения вращающегося магнитного поля

$$B_x = B_{1x}+B_{2x}+B_{3x} = B_1 - B_2 \cos 60^\circ - B_3 \cos 60^\circ =$$
$$= B_m \sin \omega t - 0{,}5 B_m \sin(\omega t - 120^\circ) - 0{,}5 B_m \sin(\omega t - 240^\circ) =$$
$$= 1{,}5 B_m \sin \omega t,$$

$$B_y = B_{1y}+B_{2y}+B_{3y} = 0 - B_2 \cos 30^\circ + B_2 \cos 30^\circ =$$
$$= -0{,}866\, B_m \sin(\omega t - 120^\circ) + 0{,}866 B_m \sin(\omega t - 240^\circ) =$$
$$= 1{,}5 B_m \cos \omega t.$$

Результирующий вектор магнитной индукции

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = 1{,}5 B_m \sqrt{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t)} = 1{,}5 B_m. \quad (1$$

Абсолютная величина результирующего вектора ма нитной индукции (не зависит от времени) в полтора р за больше амплитуды магнитной индукции в каждо катушке.

Этот вектор вращается в пространстве с углово скоростью ω и проходит угловой путь ωt за один перио переменного тока — один оборот магнитного поля. Есл поменять направление тока в любых двух катушка (фазах), то направление вращения — результирующ го вектора магнитной индукции — изменится на о

ратное, т. е. для изменения направления вращения магнитного поля достаточно поменять местами две любые фазы, подводимые к обмотке статора двигателя.

Пульсирующее магнитное поле

При подключении одной обмотки к сети однофазного переменного тока магнитное поле изменяется по величине, но не вращается. Оно располагается по одной оси, пульсирует

$$i = I_m \sin \omega t, \quad b = B_m \sin \omega t.$$

Одно пульсирующее магнитное поле можно представить как сумму двух одинаковых вращающихся в разные стороны магнитных полей (рис. 3, а, б).

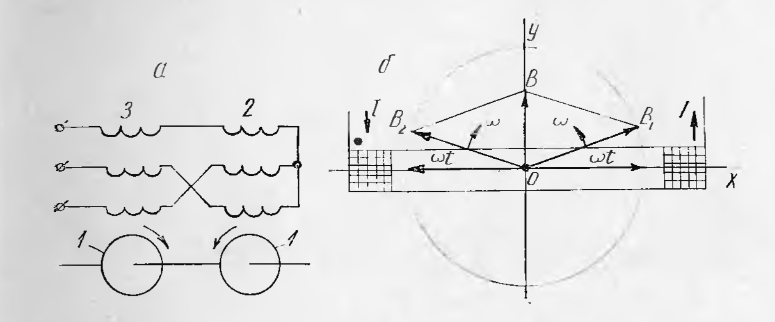


Рис. 3. Разложение пульсирующего поля на два вращающихся: *а* — электрическая схема трехфазного аналога пульсирующего магнитного поля: *1* — ротор; *2* — обмотка, создающая прямое поле; *3* — обмотка, создающая обратное поле; *б* — картина магнитного поля

Если два трехфазных двигателя и обмотки их статоров соединить, как показано на рис. 3, а, а роторы соединить между собой, то получим трехфазный аналог однофазного двигателя с пульсирующим магнитным полем. Одно пульсирующее магнитное поле выражается через два вращающихся (рис. 3. б).

Выберем за начало отсчета времени момент, когда векторы B_1 и B_2 противоположны друг другу и равны по величине $|B_1| = |B_2|$, $t = 0$. Одно магнитное поле (B_1) назовем прямым, другое (B_2) — обратным. В этом случае результирующий вектор равен нулю ($B = 0$).

В произвольный момент времени t_1 вектор магнитно индукции B_1 повернется против направления вращения ча совой стрелки на угол ωt_1, а вектор B_2—по направлени часовой стрелки на угол ωt_1. Проекция вектора B_1 н ось x: $B_{1x}=B_1 \cos \omega t_1$, проекция B_2 на ту же ось: $B_{2x}=-B_2 \cos \omega t_1$. Сумма проекций на оси x: $B_x=B_{1x}+B_{2x}=0$ при любом t. В тот же момент времени проек ции на ось y: $b_{1y}=B_1 \sin \omega t_1$ и $b_{2y}=B_2 \sin \omega t_1$. Сумм проекций на ось y:

$B_y=b_{1y}+b_{2y}=2B_1 \sin \omega t_1$. Так как $B_x=0$, то $B=B_y$.

Суммарная магнитная индукция на оси катушки равн

$$B=2B_1 \sin \omega t. \qquad (15$$

Суммарная магнитная индукция является вектором переменной величины и знака, но постоянного направ ления в пространстве, совпадающего с направлением вращающихся векторов в момент их встречи. Таким об разом, пульсирующее магнитное поле можно рассматри вать как сумму двух вращающихся в разные стороны по лей, каждое из которых имеет индукцию, равную поло вине амплитуды индукции пульсирующего поля.

Пульсирующее магнитное поле получается при от ключении одной фазы у трехфазной или двухфазной обмотки.

Если в пульсирующем магнитном поле находится ро тор асинхронного двигателя, то оба поля, прямое и об ратное, стараются повернуть ротор во взаимно противо положные стороны, и поэтому неподвижный ротор не может начать двигаться, так как оба поля создают мо менты, компенсирующие друг друга. Отсюда следует, что пусковой момент однофазного асинхронного двигателя равен нулю.

Предположим, что ротор двигателя привели во вра щение в сторону прямого поля, тогда скольжение ротора по отношению к прямому полю B_1 равно:

$$S_1=\frac{n_c-n}{n_c}.$$

Скольжение же ротора по отношению к обратному полю B_2 будет:

$$S_2=\frac{n_c-(-n)}{n_c}=\frac{n_c+n}{n_c}>S_1. \qquad (16)$$

Известно, что частота тока в роторе пропорциональна кольжению. Поэтому частота тока, наведенного в рото е прямым потоком, намного меньше частоты тока, аведенного в обмотке ротора обратным потоком. Ин уктивное сопротивление обмотки ротора току от обрат ого поля во много раз больше ее активного сопротивле ния. Поэтому ток от обратного поля оказывается почти реактивным, в то время как ток от прямого поля — поч и активный. В результате вращающий момент от пря мого поля больше тормозного момента от обратного поля, и ротор продолжает вращаться в ту сторону, ку да его раскрутили, и при этом может отдавать полезную мощность. Если ротор раскрутить в обратную сторону, то прямое поле становится обратным, а обратное — пря мым, и ротор будет продолжать вращаться в заданном направлении.

Наиболее простым способом запуска двигателя является раскручивание ротора с помощью прочного шнура длиною около метра, предварительно намотанного на вал, как у лодочного двигателя. Такой способ, однако, неудобен и применяется в том случае, когда двигатель небольшой мощности и запускается без нагрузки, а также при отсутствии различных фазосдвигающих элементов. В качестве фазосдвигающего элемента можно использовать активное сопротивление, конденсатор и дроссель. Как показали Н. В. Горохов и П. А. Ионкин, в некоторых случаях можно для получения новых пусковых схем однофазного двигателя использовать явление «ложной емкости», получающееся при электрическом соединении электрических цепей с сосредоточенными постоянными и взаимной индуктивностью.

Сравнение различных способов пуска показало, что пусковой ток для одного и того же значения момента получается наименьшим при использовании конденсаторов. Уменьшение пускового тока уменьшает колебания напряжения в линии, питающей электродвигатель, что, в свою очередь, приводит к улучшению условий пуска, так как величина вращающего момента асинхронного двигателя зависит от квадрата приложенного к его обмотке напряжения.

При одинаковых пусковых токах пусковой момент пр. использовании пускового конденсатора в 4—6 раз больше пускового момента, получаемого при использовании пускового активного сопротивления или дросселя.

Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент асинхронного двигателя выражается формулой

$$M = k \cdot \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 \frac{r_2'}{S}}{\left[\left(r_1 + c\frac{r_2'}{S}\right)^2 + \left(x_1 + cx_2'\right)^2\right]}, \qquad (17)$$

где M—вращающий момент, $H \cdot м$ или Дж при $k=1$, кГм при $k=\frac{1}{9,81}$; $\frac{1}{2\pi 9,81}=0,0162$; m_1—число фаз статора; p—число пар полюсов одной обмотки статора; f_1—частота переменного тока в статоре, Гц или пер; U_1—фазное напряжение, подведенное к статору, B; r_2^1—активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору, Ом; S—скольжение в относительных единицах; r_1—активное сопротивление одной фазы обмотки статора, Ом; x_1—индуктивное сопротивление одной фазы обмотки статора, Ом; x_2'— индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору, Ом; $c=\frac{U_1}{E_1}\approx 1,02 \div 1,06$ для двигателей нормального исполнения, мощностью более 1 кВт, E_1—э. д. с. в обмотке статора.

Рассмотрим зависимость момента от скольжения (рис. 4). Точка 1 отмечает пусковой момент двигателя, когда $S=1$, или 100%, точка 2 – максимальный (или критический) момент, скольжение при этом

$$S_к = \frac{cr_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + cx_2')^2}}, \qquad (18)$$

или упрощенно, поскольку r_1 не превышает 10 — 12% суммы $x_1 + x_2'$, а $c \simeq 1$,

$$S_к = \frac{r_2'}{x_1 + x_2}. \qquad (19)$$

Критическое скольжение $S_к = 0,06 \div 0,16$, или $6 \div 16\%$.

Точка 3 означает номинальный момент двигателя, скольжение $S_н = 0,01 \div 0,06$, или $1 \div 6\%$; точка 4 характеризует реальный холостой ход, скольжение $S_{х.х.} = 0,005$, или 0,5%, и точка 5—начало координат—точка идеального холостого хода, $S=0$; скорость вращения ротора при этом равна синхронной. Самостоятельно (без посторонней помощи) обычный асинхронный двигатель в этой точке работать не может.

Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором нормального исполнения кратность пускового момента $\frac{M_п}{M_н}=1 \div 2$; кратность максимального момента $\frac{M_м}{M_н}=1,7 \div 2,9$; кратность пускового тока $\frac{I_п}{I_н}=5 \div 7$.

Часть характеристики от точки 4 до точки 2 — это участок устойчивой работы двигателя, от точки 2 до точки 1 — участок неустойчивой работы двигателя (рис. 4). Обычно двигатель работает на участке от реального холостого хода (точка 4) до номинального режима работы (точка 3). Зависимость момента от скольжения называют иногда механической характеристикой асинхронного двигателя, чаще механической характеристикой называют зависимость оборотов от момента на ва-

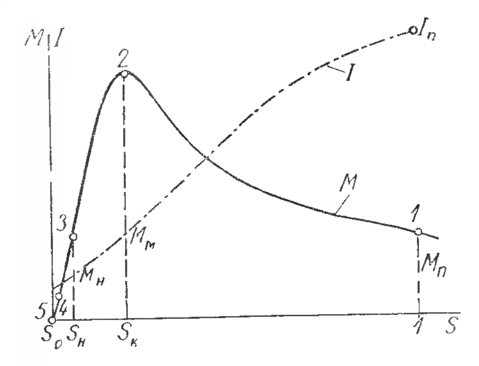


Рис. 4. Зависимость момента и тока многофазного двигателя с круговым вращающимся магнитным полем от скольжения

лу асинхронного двигателя. На рис. 4 показана также зависимость тока статора от скольжения.

Используя формулу (17), можно проанализировать влияние на кривую момента величины питающего напряжения (рис. 5) и активного сопротивления обмотки ротора (рис 6). Величина момента зависит от квадрата напряжения. При увеличенном напряжении двигатель выходит из строя, при пониженном (как только максимальный момент станет равным моменту нагрузки) — двигатель останавливается (опрокидывается). Ток, потребляемый от сети, при этом резко увеличивается, и двигатель, если его не отключить, выходит из строя. Поэтому отклонение напряжения на зажимах электродвигателей от номинального, как правило, должно быть не более $\pm 5\%$; в отдельных случаях допускаются отклонения выше номинального до $+10\%$.

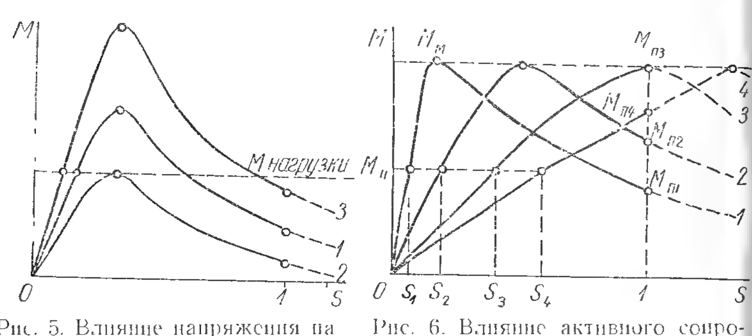


Рис. 5. Влияние напряжения на зависимость момента от скольжения:
$1 - U_1 = U_н$, $2 - U_2 < U_н$, $3 - U_3 > U_н$

Рис. 6. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на момент:
$1 - r = r_{2min}$, $2 - r_2 = r_3 > r_{2min}$, $3 - r = r_4 > r_3$, $4 - r = r_5 > r_4$

Из теории работы асинхронной машины следует, что величина максимального момента двигателя не зависит от активного сопротивления обмотки ротора. Критическое же скольжение (18) и (19) прямо пропорционально активному сопротивлению обмотки ротора. Поэтому, если в асинхронном двигателе постепенно увеличивать активное сопротивление в цепи ротора, максимальный момент по величине будет оставаться неизменным, а критическое скольжение все время увеличиваться. Пусковой момент двигателя сначала увеличивается,

$$M_{п1} < M_{п2} < M_{п3} < M_м,$$

но как только критическое скольжение станет равным единице, пусковой момент будет равен максимальному; при дальнейшем увеличении сопротивления цепи ротора критическое скольжение становится больше единицы, и пусковой момент начинает уменьшаться $M_{п3} - M_м > M_{п4}$ (рис. 6). Включение сопротивления в цепи обмотки ротора для увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока используют в асинхронных двигателях с контактными кольцами (с фазным ротором). В двигателе с короткозамкнутым ротором включить дополнительное сопротивление некуда. Можно только заменить один ротор другим. Если условно предположить, что имеются роторы с медной обмоткой (кривая момента— 1 на рис. 6), с обмоткой из алюминия или латуни (кривая момента—2), с обмоткой из нихрома (кривая момента—4) и сплошной ротор из стали или чугуна (такие асинхронные двигатели используются иногда в бормашинах и в некоторых магнитофонах—двигатели перемотки—кривая момента 3), то характеристики двигателя претерпевают изменения (рис. 6). При постоянном по величине моменте нагрузки скорость вращения ротора будет разная. Поэтому двигатель с фазным ротором позволяет регулировать скорость вращения путем изменения сопротивления в цепи обмотки ротора ($S_1 > S_3 > S_2 > S_1$). Двигатель с короткозамкнутым ротором такой особенностью не обладает.

Зависимость момента от скольжения в практических расчетах часто выражают формулой Клосса:

$$M = \frac{2M_м}{\frac{S}{S_к} + \frac{S_к}{S}}, \quad (20)$$

где M—момент двигателя при скольжении S, при котором нужно определить величину вращающего момента; $S_к$—критическое скольжение; $M_м$—максимальный момент асинхронного двигателя.

Эта формула была предложена М. Клоссом в 1916 году и используется до сих пор при анализе режимов электропривода. Формула выведена в предположении, что параметры двигателя остаются постоянными.

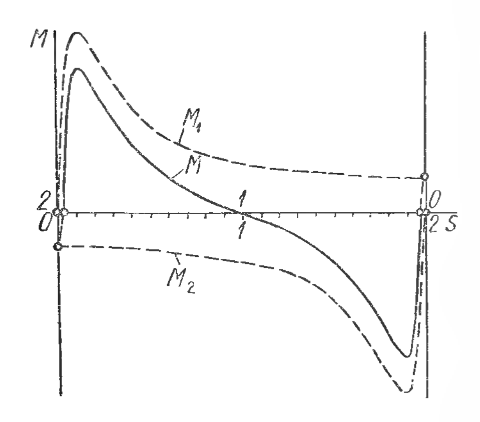


Рис. 7. Зависимость момента однофазного двигателя с пульсирующим магнитным полем от скольжения

Для однофазного двигателя с пульсирующим магнитным полем вращающий момент создается совместным действием прямого и обратного моментов (рис. 7). При этом результирующий момент равен сумме прямого M_1 и обратного M_2 моментов

$$M = M_1 + M_2, \qquad (21)$$

где момент, создаваемый током прямой последовательности,

$$M_1 = 0{,}0162 \frac{m_1 p}{f} \frac{E_1^2 \frac{r_2'}{S}}{\left(\frac{r_2'}{S}\right)^2 + \left(x_2'\right)^2}, \text{ кГм}, \qquad (22)$$

а момент, создаваемый током обратной последовательности,

$$M_2 = 0{,}0162 \frac{m_1 p}{f} \frac{E_2^2 \frac{r_2'}{2-S}}{\left(\frac{r_2'}{2-S}\right)^2 + \left(x_2'\right)^2}, \text{ кГм}. \qquad (23)$$

Наличие тормозного момента ухудшает характеристики двигателя.

По сравнению с трехфазным, а также двухфазным двигателями однофазный имеет следующие недостатки:

1. Двигатель не вращается, так как пусковой момент равен нулю

$$(S = 1; \quad M_п = 0).$$

2. Перегрузочная способность двигателя уменьшается в связи с наличием тормозного момента, создаваемого обратным полем

$$\frac{M_м}{M_п} = 1{,}3 \div 1{,}5.$$

3. Снижается к. п. д. из-за увеличенных потерь, вызванных появлением обратного поля.

4. Снижается коэффициент мощности из-за увеличения намагничивающего тока.

5. Двигатель не имеет определенного направления вращения (ротор вращается в ту сторону, куда его раскрутят).

6. При одинаковых габаритах номинальная мощность однофазного двигателя составляет не более 50—60% номинальной мощности трехфазного двигателя; пусковой ток на 30—40% больше, а пусковой момент при использовании пускового активного сопротивления составляет 45% пускового момента трехфазного двигателя.

Например, мощность трехфазного двигателя типа АОЛ-32-2 равна 1000 Вт, кратность пускового тока — 6,5, кратность пускового момента — 2,2; мощность однофазного двигателя в таких же габаритах типа АОАБ-32-2 — 600 Вт, кратность пускового тока — 9, кратность пускового момента — 1.

Отсутствие пускового момента приводит к необходимости применять специальные устройства для того, чтобы развернуть ротор.

Как и в трехфазном двигателе, при увеличении сопротивления обмотки ротора критическое скольжение однофазного двигателя увеличивается и максимальный момент перемещается в сторону больших скольжений. Однако увеличение активного сопротивления обмотки ротора влечет за собой сильное уменьшение величины максимального момента (рис. 8). Объясняется это тем, что при увеличении активного сопротивления обмотки ротора

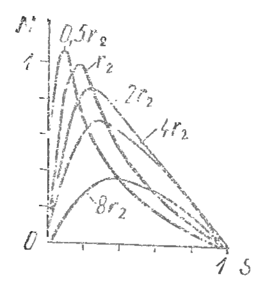


Рис. 8. Зависимость момента от скольжения при различных сопротивлениях обмотки ротора

ра сильно возрастает момент, создаваемый обратным полем, который оказывает действие на ротор.

Это обстоятельства надо учитывать при изготовлении электродвигателей, особенно когда применяются самодельные роторы. Если для однофазного или трехфазного двигателя использован сплошной массивный ротор из ферромагнитного материала (сталь или чугун), то при включении в однофазную сеть он не вращается, каким бы посторонним моментом его ни раскручивали. В подобном случае нужна дополнительная обмотка с конденсатором или другое фазосдвигающее устройство. Массивный ротор из чугуна применяется в двигателях некоторых магнитофонов и зубоврачебных бормашин, стальной — в высокоскоростных двигателях на повышенных частотах.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости скорости вращения ротора, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, момента на валу двигателя и тока, потребляемого от сети, от величины полезной мощности двигателя при постоянном напряжении и частоте переменного тока. Они позволяют находить все величины, определяющие режим работы двигателя при различных нагрузках. Эти характеристики можно построить по опытным данным непосредственной нагрузки двигателя, по расчетным данным или по данным круговой диаграммы, построенной на основе опытов холостого хода и короткого замыкания. В качестве примера приведены (рис. 9) рабочие характеристики электродвигателя электропилы типа ВАКООП мощностью 1,6 кВт, включенного в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В ($P_{2н} = 1600$ Вт; $P_{2м} = 2650$ Вт).

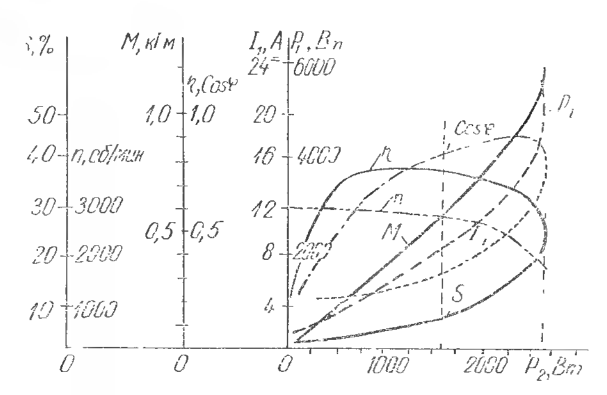


Рис. 9. Рабочие характеристики асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором

Работа асинхронного двигателя при асимметрии напряжения

Характеристики двигателя определяются для условной симметрической системы напряжений в питающей сети. На практике система напряжений в трехфазной сети обычно не бывает идеально симметричной. Действующими нормами допускается асимметрия напряжений до 5%. При асимметрии подводимых напряжений трехфазный двигатель работает с неравномерной нагрузкой фаз. Одна или две его фазы оказываются перегруженными, вследствие чего приходится снижать нагрузку двигателя, чтобы он не перегрелся и не вышел из строя.

Несимметричная система питающих линейных напряжений может быть разложена на две симметричные составляющие напряжений прямой и обратной последовательностей. Если пренебречь насыщением, то характеристики машины при несимметричном напряжении можно получить методом наложения, считая, что на зажимах машины действуют независимо друг от друга симмет-

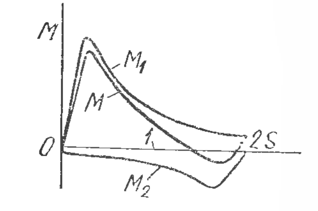


Рис. 10. Зависимость вращающего момента от скольжения при питании трехфазного асинхронного двигателя асимметричным напряжением. Коэффициент асимметрии напряжения 0,5 (50%)

ричные системы прямой и обратной последовательностей. Это упрощает анализ двигателя при асимметричном напряжении. Расчеты показывают, что при асимметрии напряжений от 2 до 6%, асимметрия линейных токов составляет 20—30%. Система прямой последовательности создает вращающий момент, а система обратной последовательности — тормозной, поэтому результирующий момент двигателя при питании от асимметричного напряжения меньше, чем при питании от симметричного напряжения (рис. 10). При асимметричном напряжении полезный момент, к. п. д. и мощность двигателя уменьшаются, а нагрев его увеличивается из-за увеличения потерь.

Коэффициент асимметрии напряжений в относительных единицах

$$\alpha_U = \frac{U_2}{U_1}, \tag{24}$$

где U_2 — напряжение обратной последовательности, U_1 — напряжение прямой последовательности.

Пусковой момент двигателя при асимметричном напряжении упрощенно можно выразить так:

$$M_{п\alpha} \approx M_п(1 - \alpha_U^2), \tag{25}$$

где $M_{п\alpha}$ — момент при асимметричном напряжении; $M_п$ — пусковой момент при симметричном напряжении.

При асимметрии напряжений 10% ($\alpha_U = 0,1$) пусковой момент уменьшается всего на 1% по сравнению с пусковым моментом при симметричном напряжении. Незначительное влияние оказывает асимметрия напряжения и на номинальный момент двигателя.

Если пренебречь намагничивающим током двигателя, то для режима работы от холостого хода до номинальной нагрузки коэффициент асимметрии фазных токов можно упрощенно выразить следующим образом:

$$\alpha_i = \frac{I_2}{I_1} \approx \alpha_U \frac{I_п}{I_н}, \tag{26}$$

где I_2 — ток обратной последовательности; I_1 — ток прямой последовательности; $\frac{I_п}{I_н} = 5 \div 7$ — кратность пускового тока.

Из (26) следует, что асимметрия тока в фазах двигателя в $5 \div 7$ раз превышает асимметрию подведенного

напряжения. Упрощенно ток одной фазы (равный арифметической сумме токов прямой и обратной последовательностей — наиболее неблагоприятный случай) примет вид:

$$I_A = I_1 + I_2 = I_1(1 + \alpha_i). \tag{27}$$

Токи в двух других фазах численно равны между собой

$$I_B = I_C = I_1\sqrt{1 - \alpha_i + \alpha_i^2}. \tag{28}$$

Для максимального значения коэффициента асимметрии напряжений 0,1 и кратности тока 7, при номинальной нагрузке на валу двигателя, фазные токи в наиболее неблагоприятном случае равны:

$$I_A = 1,7\ I_н; \quad I_B = I_C = 0,89\ I_н. \tag{29}$$

Очевидно, что при перегрузке одной из фаз по току на 70% температура обмотки в этой фазе значительно превысит допустимую. Поэтому во избежание выхода из строя двигателя за счет перегрева одной или двух фаз нагрузку на валу двигателя нужно снижать, пока ток в фазах не снизится до допустимых пределов, а температура статорной обмотки не будет превышать максимально допустимую по нормам.

Длительно допустимый ток в любой фазе статора

$$I_{доп} \approx I_н\sqrt{1 + \alpha_i}. \tag{30}$$

Длительно допустимая мощность при асимметричном напряжении

$$P_{доп} = \frac{P}{\sqrt{1 - \alpha_i}}. \tag{31}$$

Наибольшая асимметрия получается, когда вследствие перегорания плавкого предохранителя происходит обрыв одной фазы в цепи статора и трехфазный двигатель, если позволяют условия нагрузки, будет работать в режиме однофазного двигателя. Этот режим работы опасен для двигателя. При переходе трехфазного двигателя в однофазный режим скорость вращения практически не изменяется, и если нагрузка на валу не уменьшается, то ток, потребляемый от сети, будет значительно больше номинального, а к. п. д. и коэффициент мощности — меньше номинального. В этом случае в резуль-

тате перегрева обмоток двигатель выйдет из строя. Работа «на двух фазах» нередко является причиной повреждения трехфазных двигателей при их защите плавкими предохранителями: они выбираются так, чтобы плавкая вставка не перегорела при пуске двигателя. Плавкий предохранитель не защищает двигатель от перегрузки. Тепловые же реле в магнитном пускателе защищают двигатель при перегрузке и отключают его, если он работает «на двух фазах».

При работе трехфазного двигателя от однофазной сети с использованием какого-либо фазосдвигающего устройства приходится считаться с асимметрией напряжений и токов в обмотках статора. Изменение токов в разных фазах неодинаково. С уменьшением нагрузки ток в одной (рабочей) фазе уменьшается, в другой (конденсаторной) увеличивается и при холостом ходе достигает наибольшего значения. Третья фаза (вспомогательная) при холостом ходе и незначительной нагрузке работает в генератором режиме, и ее активная мощность отрицательна. С возрастанием нагрузки она переходит из генераторного режима в двигательный. Ток ее при этом сначала уменьшается, достигает минимального значения и затем опять увеличивается. Равенства токов всех фаз номинальному значению не достигается. Поэтому за номинальную принимают нагрузку, при которой токи в двух фазах равны номинальному току, а ток в третьей фазе составляет 70 -85% его номинальной величины.

Активная мощность по фазам распределяется также неравномерно. При номинальной нагрузке одна фаза — главная - развивает такую же мощность, как вместе взятые конденсаторная и вспомогательная фазы. Работа трехфазного двигателя в однофазном режиме может быть исследована методом симметричных составляющих.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

Трехфазный асинхронный двигатель можно использовать в качестве однофазного. Однако при работе от однофазной сети трехфазный электродвигатель может длительно развивать мощность не более 50 - 60% его мощности в трехфазном номинальном режиме. Трехфазный асинхронный электродвигатель должен быть включен в однофазную сеть по соответствующей схеме.

Схемы с пусковым активным сопротивлением

На рис. 11 показаны некоторые схемы однофазного включения трехфазного двигателя с пусковым активным сопротивлением. Схема *а*) дает больший пусковой мо-

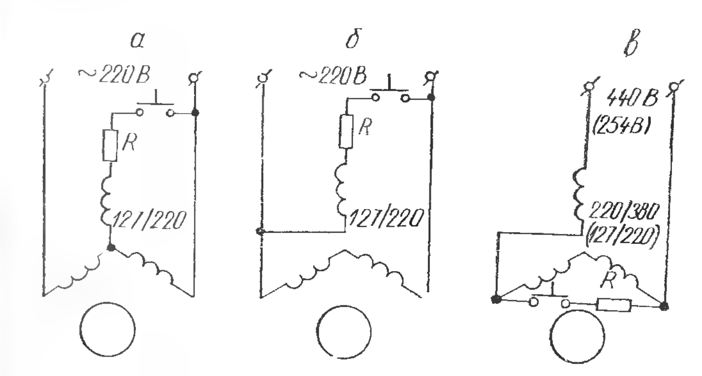


Рис. 11. Схемы однофазного включения трехфазного двигателя с пусковым активным сопротивлением:

а — соединение обмоток статора в звезду; б — параллельное соединение рабочей и пусковой обмоток статора; в — последовательное соединение обмоток статора

мент и примерно в два раза больший максимальный момент, чем схема *б*), поэтому ее можно рекомендовать для практики. Но в схеме в зависимости от данных двигателя возможен значительный провал в кривой вращающего момента из-за влияния третьей гармоники. Величина необходимого пускового активного сопротивления приближенно может быть определена по формуле:

$$R=(0{,}4\div1{,}3)\ \frac{\eta_н \cos\varphi_н}{\frac{I_п}{I_н}\cdot P_н},\ \text{Ом}, \qquad (32)$$

где 0,4÷1,3 — коэффициент, зависящий от характеристик двигателя; $\eta_н$ — к. п. д. при номинальной нагрузке, %; $\cos\varphi_н$ — коэффициент мощности при номинальной нагрузке; $I_п/I_н=5\div7$ — кратность пускового тока; $P_н$ — номинальная мощность двигателя в трехфазном режиме, кВт.

Схема *б*) дает меньший пусковой и максимальный моменты. Влияние третьей гармоники потока в этой схеме отсутствует. Величина необходимого активного пускового сопротивления приближенно может быть определена по формуле:

$$R=0{,}7\,\frac{\eta_н \cos\varphi_н}{\frac{I_п}{I_н}\quad P_н}\cdot \qquad (33)$$

Величина пускового активного сопротивления для схемы, приведенной на рис. 11, *б*, приближенно определяется из равенства:

$$R=Z\ , \qquad (34)$$

т. е. максимальный пусковой момент получается, когда активное пусковое сопротивление равно по величине сопротивлению короткого замыкания одной фазы двигателя — $Z_к$.

Величина активного пускового сопротивления, необходимая для включения во вспомогательную фазу, чтобы получить наибольший пусковой момент, должна численно равняться абсолютному значению полного сопротивления вспомогательной фазы — пусковой обмотки. Окончательно величина пускового активного сопротивления уточняется опытным путем. Необходимо помнить,

Таблица 1

Ориентировочная величина активного пускового сопротивления в зависимости от мощности двигателя

Мощность двигателя, кВт		0,6	1,0	1,7	1,8	4,5
Величина пускового сопротивления, Ом . . .	схема рис. 11, *а*	25—30	20—25	10—15	5—10	3—5
	схема рис. 11, *б*	10—15	8—10	6—8	3—6	1,5—3
Диаметр провода пускового сопротивления из фехраля или нихрома, мм		1,2	1,5	1,7	2,0	2,5
Примерная длина провода, м		28	28	19	18	24

что по пусковому сопротивлению в момент пуска протекает ток, в 5—6 раз превышающий номинальный ток в трехфазном режиме. Кроме того, при напряжении сети 220 В необходим двигатель, обмотки которого рассчитаны на напряжение 220/127 В, если же в паспорте двигателя указано 380/220 В, то к нему при соединении обмотки в звезду необходимо подводить напряжение 440 В.

В двигателях с пусковым активным сопротивлением (специально изготовленных) пусковая обмотка отличается от рабочей большим активным сопротивлением и небольшой индуктивностью. И хотя угол сдвига фаз между токами в рабочей и пусковой фазах при пуске меньше 90°, пусковые свойства двигателей оказываются удовлетворительными

$$\frac{M_п}{M_н}=0{,}8\div1{,}2,\qquad \frac{I_п}{I_н}=6{,}5\div9.$$

Электродвигатели с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки широко используются там, где не требуется больших пусковых моментов. Данные некоторых двигателей приведены в приложении.

В случае необходимости получения больших пусковых моментов в качестве фазосмещающего элемента применяют конденсатор.

Схема с пусковым конденсатором

Если в схемах, данных на рис. 11, активное сопротивление заменить конденсатором, то получаются схемы с пусковым конденсатором. Использование пусковых конденсаторов дает возможность повысить пусковой момент до значений

$$\frac{M_п}{M_н} = 1,6 \div 2.$$

Однако необходимая величина емкости пускового конденсатора довольно большая, вследствие чего увеличиваются размеры и стоимость конденсаторной батареи.

Для схемы, изображенной на рис. 11, в, необходимая емкость конденсатора, если имеет место максимальный пусковой момент, определяется из соотношения

$$x_с = z_к, \qquad (35)$$

т. е. емкостное сопротивление равно сопротивлению короткого замыкания одной фазы статора. Поэтому конденсаторный пуск применяется лишь при необходимости большого пускового момента.

Как уже отмечалось, по окончании процесса пуска цепь пусковой обмотки следует отключить, иначе пусковая обмотка перегреется и двигатель выйдет из строя.

В качестве фазосдвигающего устройства можно использовать индуктивное сопротивление — дроссель.

Схемы с рабочим конденсатором (конденсаторный двигатель)

Вопросу теории и расчета конденсаторного двигателя уделено много внимания в опубликованной отечественной и иностранной литературе. В 1934 году академик В. С. Кулебакин рассмотрел основные свойства конденсаторного двигателя и указал на широкие возможности его применения в народном хозяйстве и, в частности, на электротранспорте. Данные теоретических и экспериментальных исследований асинхронных двигателей с тремя статорными обмотками специального исполнения, включаемых в однофазную сеть, приведены в

работах М. Крандля, В. Шуйского, И. М. Эдельмана, Г. Б. Меркина, Н. М. Булаева и др.

Наиболее распространены схемы с постоянно включенным рабочим конденсатором (рис. 12). Они пригодны для случая, когда двигатель пускается вхолостую или с небольшой нагрузкой на валу. Эти схемы позволяют загрузить двигатель на 75–85% его мощности при трехфазном включении. Поскольку конденсатор все время включен, двигатель называют конденсаторным. Переключатель (рис. 12, *а*, *б*) используется для изменения направления вращения двигателя. Если двигатель вращается в одну сторону, то переключатель не нужен. Для изменения направления вращения двигателя в случае параллельного соединения обмоток статора (рис. 12, *в*) необходимо изменять направление тока в любой из двух обмоток.

Для схемы *а*) рабочая емкость определяется по формулам:

$$C_р = 2800 \frac{I_н}{U_п}, \text{ мкФ}, \qquad (36)$$

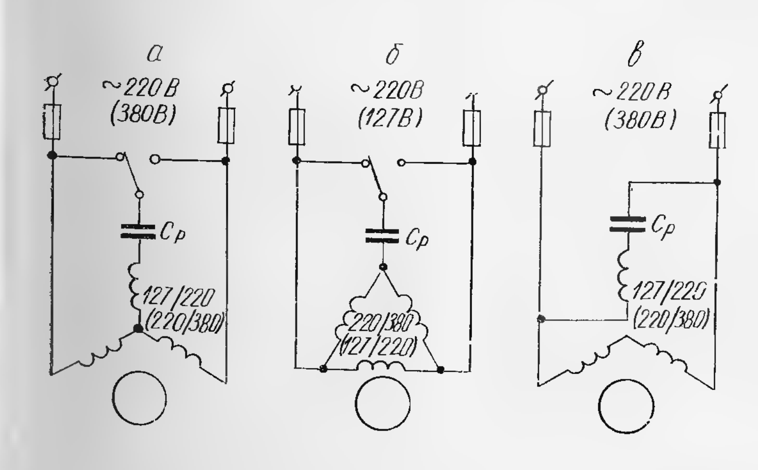


Рис. 12. Наиболее распространенные схемы однофазного включения трехфазного двигателя с рабочей емкостью:

а — соединение обмоток статора в звезду; *б* — соединение обмоток статора в треугольник; *в* — параллельное соединение обмоток статора

где $C_р$ — рабочая емкость при номинальной нагрузке мкФ; $U_н$ — номинальное (линейное) напряжение сети, В $I_н$ — номинальный ток, A;

$$I_н = \frac{P_н \cdot 10^3}{1{,}73 U_н \eta_н \cos\varphi_н},$$

где $P_н$ — номинальная мощность, кВт; $\eta_н$ — к. п. д. при номинальной нагрузке; $\cos\varphi_н$ — коэффициент мощности при номинальной нагрузке;

$$C_р = \frac{P_н \cdot 10^9}{2\pi f U_н^2}, \text{ мкФ}, \qquad (37)$$

где $P_н$ — номинальная мощность двигателя, кВт; f — частота переменного тока, Гц;

$$C_р = \frac{1{,}2 P_н \cdot 10^6}{(U_н \cos\varphi_н)^2 \eta_н}, \text{ мкФ}. \qquad (38)$$

Напряжение на конденсаторе приблизительно равно напряжению сети. Пусковой момент меньше номинального.

Для схемы *б*) рабочая емкость определяется по формуле

$$C_р = 4800 \frac{I_н}{U_н}, \text{ мкФ}. \qquad (39)$$

Напряжение на конденсаторе приблизительно равно номинальному напряжению сети. Пусковой момент меньше номинального.

Для схемы *в*) рабочая емкость находится по следующей формуле:

$$C_р = 2740 \frac{I_н}{U_н}, \text{ мкФ}. \qquad (40)$$

Р. К. Томас рекомендует формулу:

$$C_р = 2750 \frac{I_н}{U_н}, \text{ мкФ}.$$

Используется также формула

$$C_р = \frac{P_н \cdot 10^9}{8\pi f U^2_{н.ф.}} = \frac{P_н \cdot 10^9}{8{,}4 f U_н^2}, \text{ мкФ}. \qquad (41)$$

Напряжение на конденсаторе примерно на 15% превышает напряжение сети. Пусковой момент может быть равен номинальному и даже превышать его.

Если же двигатель пускается в ход со значительной нагрузкой, то параллельно рабочему конденсатору подключается на момент пуска пусковая емкость, величина которой определяется из соотношения

$$C_п = (2{,}5 \div 3) C_р. \qquad (42)$$

В этом случае пусковой момент близок к номинальному. Если при пуске надо получить больший момент (близкий к максимальному), то пусковую емкость определяют из соотношения

$$C_п = (6 \div 8) C_р. \qquad (43)$$

Однако реализация этого условия сопряжена с появлением значительных перенапряжений в цепи конденсаторной фазы и на практике используется редко.

На рис. 13 приведена схема трехфазного двигателя, обмотки которого соединены в звезду. Двигатель подключен к однофазной сети с использованием рабочего и пускового конденсаторов. После пуска двигателя пусковой конденсатор должен быть отключен.

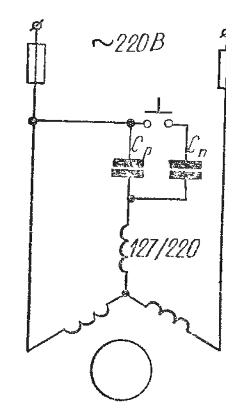


Рис. 13. Схема подключения трехфазного двигателя в однофазную сеть с использованием рабочего и пускового конденсаторов

При напряжении в сети 220 В, частоте 50 Гц и схеме соединения обмотки статора в звезду или треугольник величина рабочей и пусковой емкости может быть выбрана ориентировочно (табл. 2).

Кроме рассмотренных, существуют и другие схемы включения трехфазного двигателя в однофазную сеть (см. работы А. И. Адаменко). Схема, приведенная на рис. 14, *а*, с последовательным соединением обмоток и однократным шунтированием требует для своей работы повышенного напряжения, равного удвоенному фазному напряжению, и позволяет получить 70—85% мощности трехфазного дви-

Таблица

Ориентировочная величина емкости пускового и рабочего конден саторов для схем, приведенных на рис. 12, а, б

Мощность двигателя по паспорту, Вт	Емкость конденсатора, мкФ			
	рабочая		пусковая	
	звезда	треугольник	звезда	треугольник
10	0,6	1,0	1,8	3,0
20	1,2	2,0	3,6	6,0
30	1,8	3,0	5,4	9,0
40	2,4	4,0	7,2	12
50	3,0	5,0	9	15
60	3,6	6,0	10,8	18
70	4,2	7,0	12,6	21
80	4,8	8,0	14,4	24
90	5,4	9,0	16,2	27
100	6,0	10,4	18	31,2
120	7,2	12,4	21,6	27
180	11	18	22	31,2
250	15	25	45	75
270	16	27	49	81
300	18	31	54	93
400	24	40	72	120
500	30	50	90	150
600	36	60	108	180
800	48	80	114	240
1000	60	104	180	312
1700	80	218	240	654

тателя. Схема *б*) требует для работы напряжения, рав ного фазному, что позволяет использовать двигатель, рас считанный на напряжение 380/220 В от сети напряжение 220 В, не соединяя обмотки в треугольник. Это отличае ее от схемы, данной на рис. 12, *в*, к которой необходим подводить напряжение, равное линейному ($127\cdot\sqrt{3}=220$ В) Получаемая мощность —70—85% мощности трехфазног двигателя. Рабочая емкость определяется по формуле

$$C_p = 1600\,\frac{I_н}{U_н}. \qquad (44$$

Напряжение на конденсаторе приближенно равн удвоенному напряжению сети. Пусковой момент при-

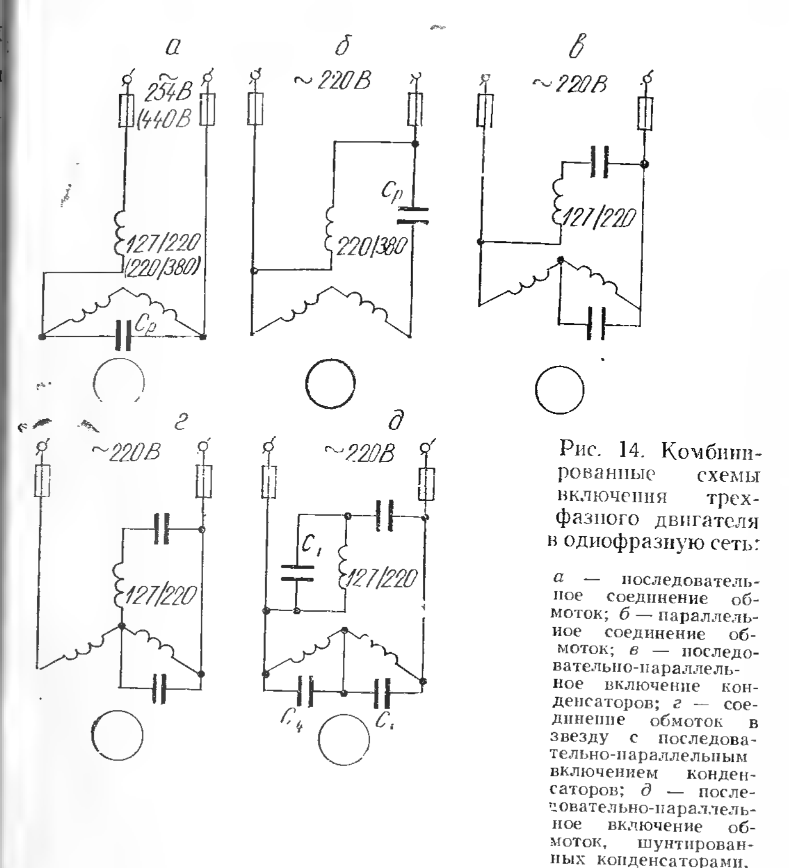


Рис. 14. Комбинированные схемы включения трехфазного двигателя в однофразную сеть:

а — последовательное соединение обмоток; *б* — параллельное соединение обмоток; *в* — последовательно-параллельное включение конденсаторов; *г* — соединение обмоток в звезду с последовательно-параллельным включением конденсаторов; *д* — последовательно-параллельное включение обмоток, шунтированных конденсаторами.

мерно равен номинальному и может превышать его. Схема с последовательно-параллельным включением трехфазных обмоток (рис. 14, *в*) требует линейного напряжения (по отношению к трехфазному двигателю при соединении обмоток в звезду). Получаемая мощность — до 100% мощности трехфазного двигателя. На рис. 14, *г* показана схема с трехфазной обмоткой, соединенной в звезду, с параллельными и последовательными емкостями. Напряжение питания должно равняться линейному напряжению трехфазного двигателя (при соединении обмоток в звезду). Получаемая мощность — от 94 до 100% мощности трехфазного двигателя. На рис. 14, *д* приведена схема с последовательно-параллельным вклю-

чением обмоток, шунтированных конденсаторами. Напряжение питания должно равняться линейному напряжению трехфазного двигателя (при соединении обмоток в звезду). Эта схема включения дает 100% использования мощности трехфазного двигателя. Емкость конденсаторов (мкФ) определяется по формулам:

$$C_1 = C_4 = \frac{10^6}{314}\frac{I_{н.ф.}}{U_{н.ф.}}\left(\sin\varphi_н - \frac{1}{\sqrt{3}}\cos\varphi_н\right), \quad (45)$$

$$C_2 = \frac{10^6}{314}\frac{I_{н.ф.}}{U_{н.ф.}}\frac{\cos\varphi_н}{\sqrt{3}}, \quad (46)$$

$$C_3 = \frac{10^6}{314}\frac{I_{н.ф.}}{U_{н.ф.}}\left(\sin\varphi_н + \frac{1}{\sqrt{3}}\cos\varphi_н\right), \quad (47)$$

где $I_{н.ф.}$ — номинальный фазный ток, *А*; $U_{н.ф.}$ — номинальное фазное напряжение, *В*; $\cos\varphi_н$ — номинальный коэффициент мощности исходного трехфазного двигателя.

При соблюдении условий

$$C_1 = C_4, \quad (48)$$

$$C_3 = 2C_2 + C_1 \quad (49)$$

в схеме обеспечивается отсутствие третьих пространственных гармоник магнитного поля, что повышает энергетические показатели в рабочем режиме и улучшает пусковые свойства. Общий коэффициент мощности схемы емкостный и при уравновешенном режиме (круговое поле) равен 0,866. В уравновешенном режиме напряжения на конденсаторах C_1, C_3 и C_4 равны фазному напряжению обмоток, на конденсаторе C_2 — удвоенному фазному напряжению. Для сети с напряжением 220 В конденсаторы C_1, C_3 и C_4 выбираются с номинальным напряжением не менее 150 В, конденсатор C_2 — с напряжением не менее 250 В. Тип конденсаторов — МБГЧ.

В рассмотренных схемах напряжение на конденсаторах не постоянно. Оно увеличивается при уменьшении нагрузки, достигая наибольшей величины при холостом ходе (на 20—25% выше напряжения на конденсаторах при номинальной нагрузке). Ток в конденсаторной фазе на холостом ходу на 20—40% превышает номинальный, что может вызвать недопустимый перегрев обмотки. Поэтому следует предотвращать холостой ход двигателя

или уменьшать емкость рабочего конденсатора на 15—20% расчетной, чтобы ток в обмотке не превышал максимального.

Подробнее с различными методами расчета однофазных, двухфазных и трехфазных двигателей, работающих от однофазной сети, можно познакомиться в работах В. Е. Розенфельда, М. И. Крайцберга, Б. Н. Тихменева, Ю. С. Чечета, Д. А. Городского, А. М. Бамдаса, Е. М. Голдовского, Е. М. Лопухиной и Г. С. Сомихиной, А. И. Адаменко, Г. Б. Меркина, Н. Д. Торопцева и др.

Использование индуктивного и активного сопротивлений для пуска в ход трехфазного асинхронного двигателя

Используя индуктивное и активное сопротивления (статический расщепитель фаз), можно осуществить сдвиг фаз и подать от однофазной сети на трехфазный асинхронный двигатель некоторое трехфазное напряжение, что обеспечит его запуск. После этого пусковые сопротивления отключаются, и двигатель нормально работает как однофазный. Две схемы пуска приведены на рис. 15. Схема *а*) позволяет получить при пуске от однофазной сети около 18% пускового момента при пуске от трехфазной сети. Линейные токи при этом составляют 87% значений пусковых токов при пуске от трехфазной сети. Схема *б*) позволяет получить при пуске от однофазной сети около 37% пускового момента при пуске от трехфазной сети. Линейные токи при этом достигают до 200% значений пусковых токов при пуске от трехфазной сети.

Наивыгоднейшими значениями сопротивлений (активного и индуктивного) считаются те, которые обеспечивают максимальный пусковой момент для заданного линейного напряжения или, если при таких значениях возникает чрезвычайно большой ток, то наивыгоднейшими значениями могут быть те, которые дают максимальный пусковой момент при произвольно выбранном пусковом линейном токе. Зависимость пускового момента от сопротивления для двигателя мощностью 5 л. с. (схема, данная на рис. 15, *а*) при условии, что внешнее индуктивное сопротивление постоянно и равно 1 Ом, а активное сопротивление изменяется, показано на рис. 16, кривая 1. Как следует из графика, вначале, при увеличении

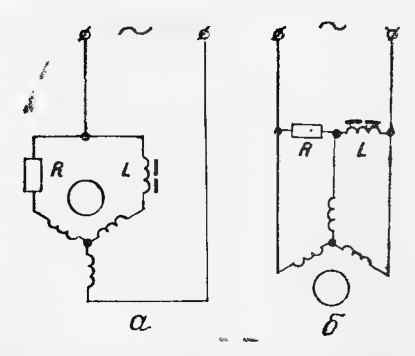


Рис. 15. Использование активных и индуктивных сопротивлений для пуска в ход трехфазных двигателей:

а — схема с меньшим пусковым моментом и пусковым током, примерно равным пусковому току в случае трехфазной сети; *б* — схема с пусковым моментом, примерно в два раза больше, чем в схеме *а* и пусковым током, примерно в два раза превышающим пусковой ток в случае трехфазной сети.

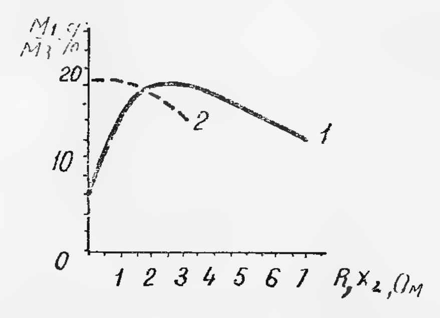


Рис. 16. Зависимость относительного пускового момента двигателя от величины сопротивления для схемы, приведенной на рис. 15, *а*:

1 — *x* = 1 Ом—*const*, *r* — переменная; *2* — *r* = 2,32 Ом — *const*, *x* — переменная

активного сопротивления, пусковой момент увеличивается и достигает максимального значения при величине активного сопротивления 2,32 Ом.

Дальнейшее увеличение активного сопротивления ведет к уменьшению пускового момента. Кривая 2 (рис. 16) относится к случаю, когда активное сопротивление постоянно и равно 2 Ом, а индуктивное сопротивление изменяется.

Используя обе эти зависимости для различных зна-

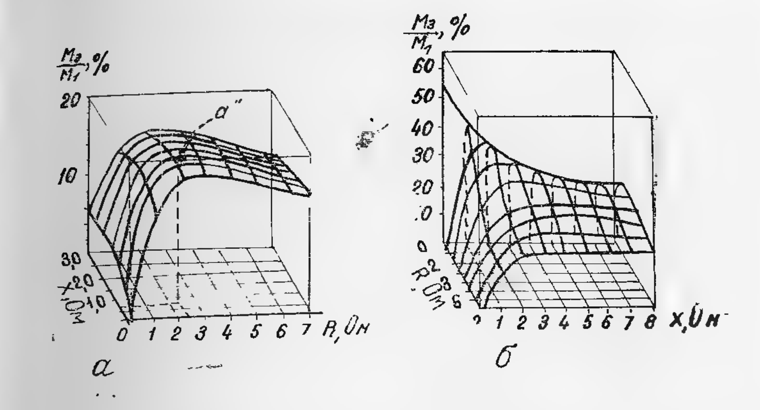


Рис. 17. Пространственные диаграммы относительных моментов в зависимости от величины активного и индуктивного сопротивлений:

а — для схемы, данной на рис. 15, *а*, точка «а» — наивыгоднейшая; *б* — для схемы, данной на рис. 15, *б*.

чений сопротивлений можно построить семейство характеристик и пространственную диаграмму, выражающую зависимость пускового момента трехфазного двигателя при однофазном пуске от активного и индуктивного сопротивлений (рис. 17, *а*). Пространственная диаграмма дает как бы поверхность пусковых моментов, пользуясь которой, можно найти для данного конкретного случая оптимальное значение. Наивыгоднейшее значение на рис. 17, *а* отмечено точкой «а». Вторая пространственная диаграмма моментов (рис. 17, *б*) построена для случаев включения того же двигателя по схеме, данной на рис. 15, *б*.

Теоретические и экспериментальные исследования обеих схем выполнены Ф. Гордоном и Е. Вальтером. На основании этих исследований построены пространственные диаграммы, данные приведены в табл. 3.

Из таблицы следует, что для схемы (рис. 16, *б*) оптимальное значение активного сопротивления численно равно значению индуктивного сопротивления. В обеих схемах рис. 16 в качестве индуктивного сопротивления использовался дроссель, сердечник которого ферромагнитный с воздушным зазором. Дроссель имел несколько выводов от разного числа витков.

Таблица 3

Наивыгоднейшие значения активных и реактивных сопротивлений

Данные двигателя						Схема включения			
тип ротора	мощность, л. с.	напряжение, *B*	сопротивление, Ом			по рис. 15, а		по рис. 16, б	
			r	*x*	*z*	*R*, Ом	*X*, Ом	*R*, Ом	*X*, Ом
С большим индуктивн. сопротив.	7,5	110	0,137	0,297	0,327	0,5	0,15	0,42	0,42
Обычная беличья клетка	3	110	0,584	0,628	0,858	0,888	0,713	1,28	1,28
Двойная беличья клетка	7,5	110	0,139	0,286	0,345	0,5	0,28	2,52	2,52
Обычная беличья клетка	5	220	0,86	1,51	1,74	2,4	0,75	5,1	5,1
Фазный ротор	15	110	0,074	0,164	0,183	0,4	0,064		

Использование взаимной индуктивности для пуска в ход асинхронных двигателей

Исследованиями Н. В. Горохова и П. А. Ионкина показано, что в некоторых случаях, имеющих место в электрических цепях с сосредоточенными постоянными и взаимной индуктивностью, явление взаимной индуктивности можно использовать для получения необходимого сдвига фаз и пуска в ход асинхронных двигателей.

На рис. 18, *а*, показана схема для двухфазного двигателя, на рис. 18, *б* — для трехфазного. При определенных значениях параметров схемы можно получить сдвиг фаз между вектором тока одной из ветвей и приложенным напряжением, равный 90° и более. В этом случае мощность из одной цепи передается в другую. К сожалению, для использования этого способа пуска нужны специально изготовленные двигатели.

Использование асинхронного расщепителя фаз для пуска в ход трехфазного двигателя

Если двухфазный асинхронный двигатель включить в однофазную сеть как однофазный, используя только одну обмотку статора — двигательную, то в другой обмотке (генераторной) при вращении ротора возникает э. д. с. Исследования Эйхберга (1902 год) показали, что чем ближе число оборотов к синхронному, тем ближе сдвиг фаз к 90°. При одинаковом числе витков двигательной и генераторной обмоток возникающая э. д. с.

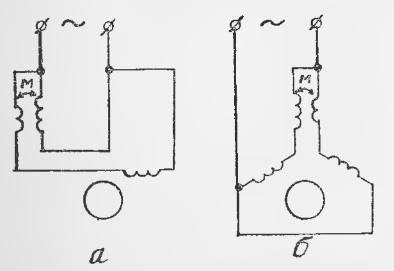


Рис. 18. Схемы с использованием явления взаимной индуктивности для пуска в ход асинхронных двигателей:
а — двухфазный двигатель, *б* — трехфазный двигатель

близка по величине к напряжению сети. Это явление используется в настоящее время в асинхронных тахогенераторах.

Если включить трехфазный асинхронный двигатель в однофазную сеть «на две фазы» как однофазный, в свободной (генераторной) фазе, а также в двигательных фазах наводится э. д. с., вследствие чего распределение фазовых и линейных напряжений почти целиком дополняется до обычной трехфазной системы. Такая система преобразования фаз имеет то преимущество, что преобразованию подвергается не вся мощность, потребляемая двигателем-нагрузкой, а лишь часть ее — примерно половина, половина же мощности берется непосредственно от сети однофазного тока. Использование трехфазного асинхронного двигателя в качестве расщепителя фаз было предложено профессором Арно около 70 лет назад.

Асинхронные и синхронные расщепители фаз (США, 1915 г.) применялись на электровозах переменного тока для питания тяговых двигателей трехфазного тока (два двигателя по 600 кВт каждый). В электровозах более позднего выпуска (1922—1924 гг.) асинхронные расщепители фаз были заменены синхронными. Все они выпускались фирмой «Вестингауз». Асинхронный расщепитель фаз с емкостной компенсацией использовался для питания собственных нужд электровоза типа Н60, построенного в 1957 году в СССР, а также на одном из французских электровозов (СС6052). Создаваемое обмотками статора обратновращающееся магнитное поле машины компенсируется короткозамкнутой обмоткой ротора, являющейся в этом случае демпфирующей. Запуск расщепителя фаз осуществляется с помощью конденсатора или постороннего двигателя (реже). От одного расщепителя можно питать целую группу трехфазных двигателей.

Чаще всего применяется схема асинхронного расщепителя фаз, данная на рис. 19. Сначала включением двухполюсного рубильника пускается в ход асинхронный расщепитель фаз *1*, трехполюсный рубильник при этом разомкнут. Расщепитель фаз пускается в ход как конденсаторный двигатель с помощью конденсатора *2*, емкость которого определяется по приведенным ранее формулам. Затем включением трехполюсного рубильника приводится в действие трехфазный электродвига-

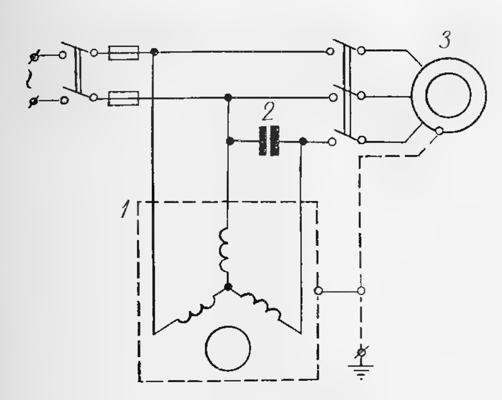


Рис. 19. Схема включения трехфазного электродвигателя в однофазную сеть с помощью асинхронного расщепителя фаз:

1 — асинхронный расщепитель фаз — обычный трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; 2 — рабочий, пусковой и компенсирующий конденсатор; 3 — трехфазный двигатель (или группа двигателей, каждый из которых пускается по очереди)

тель *3* (или группа двигателей, каждый из которых пускается по очереди после завершения пуска предыдущего двигателя).

Несмотря на кажущуюся конструктивную простоту расщепителей фаз, теория их сложна. Недостатком расщепителя является зависимость симметрии трехфазного напряжения от напряжения сети и величины нагрузки. Кроме того, его коэффициент мощности сравнительно низкий. Для уменьшения влияния нагрузки на симметрию напряжения применяют емкостную компенсацию (рис. 20).

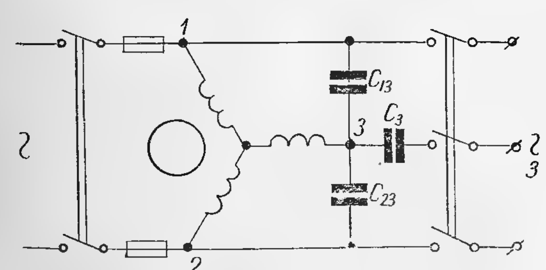


Рис. 20. Схема асинхронного расщепителя фаз с емкостной компенсацией асимметрии напряжения:

C_{13} — пусковой и рабочий конденсатор, он же используется для поперечной компенсации; C_{23} — конденсатор поперечной компенсации; C_3 — конденсатор последовательной компенсации; 1, 2, 3 — фазы сети.

При этом уменьшается влияние индуктивных сопротивлений обмоток, связанных с рассеянием. Схема, приведенная на рис. 20, позволяет получить симметричное напряжение при использовании в качестве расщепителя обычных асинхронных двигателей с номинальной мощностью, не превосходящей полной мощности нагрузки; реактивная мощность батареи конденсаторов в этом случае достигает половины полной мощности нагрузки.

Иногда применяют неполную компенсацию, используя только один конденсатор — C_{13}, который используется и как пусковой. Для уменьшения асимметрии напряжений можно использовать (по К. А. Кругу) трансформатор (рис. 21), с помощью которого в третью фазу вводят дополнительную э. д. с. Увеличить коэффициент мощности и несколько уменьшить асимметрию напряжения можно путем синхронизации ротора расщепителя фаз при помощи возбуждения обмотки ротора постоянным током. Асинхронный расщепитель в этом случае превращается в синхронный.

Асимметрию напряжения можно также уменьшить за счет специальной конструкции асинхронного расщепителя фаз — машину выполняют с минимальным рассеянием обмоток статора и ротора, с малым числом витков, кроме того, обмотку расщепителя выполняют асимметричной, что дает асимметрию при холостом ходе и симметричное трехфазное напряжение при номинальной нагрузке.

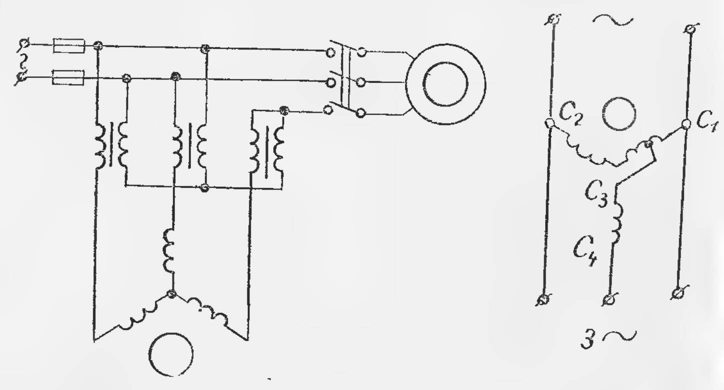


Рис. 21. Схема включения добавочного трансформатора для уменьшения асимметрии напряжения асинхронного расщепителя фаз.

Рис. 22. Схема асимметричного расщепителя фаз, который обеспечивает симметричное напряжение при номинальной нагрузке.

Для электровозов переменного тока нашей промышленностью выпускается расщепитель фаз НБ-455А мощностью 115 кВА на напряжение 380 В при 1400 об/мин. Его пуск в ход осуществляется через добавочное активное сопротивление. Схема этого расщепителя приведена на рис. 22. Обмотки C_1 и C_2 — двигательные, они имеют соответственно 28 и 44 витка. Обмотка C_3-C_4 — генераторная, она имеет 54 витка. Метод расчета параметров асинхронного расщепителя разработан Н. Х. Ситником.

Расщепитель фаз обычно работает вхолостую, но его можно загружать небольшой нагрузкой (привод заточного устройства, вентилятор и т. д.). Однако нагрузка на валу расщепителя не должна превышать 30—40% номинальной мощности трехфазного двигателя.

Часто в качестве расщепителя фаз используют обычный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Мощность такого двигателя должна составлять не менее 70—100% мощности нагрузки (электроинструмента). Чем больше мощность расщепителя фаз по сравнению с мощностью нагрузки, тем меньше асимметрия трехфазного напряжения.

Применяя постоянно включенные конденсаторы для частичной или полной компенсации можно уменьшить, как уже говорилось, асимметрию трехфазного напряжения в допустимых пределах. Желательно, чтобы скорость вращения асинхронного двигателя, используемого в качестве расщепителя фаз, была как можно выше (2850—2870 об/мин.). В таком случае у этих двигателей будет более высокий коэффициент мощности и меньший ток холостого хода, чем у двигателей равной мощности, но тихоходных.

Как показал В. Д. Сало, применение асинхронных трехфазных двигателей нормального исполнения в параллельном однофазном—трехфазном режиме на полевых зерноочистительных токах при однофазном питании даст возможность на 30—40% снизить стоимость электрификации этих объектов.

Рекомендации и примеры использования трехфазных асинхронных двигателей от однофазной сети

Выбор схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть производится с учетом напряжения сети, данных электродвигателя, условий его работы, а также средств, которыми располагают для создания необходимого сдвига фаз. Схема выбрана правильно, если любая из обмоток трехфазного двигателя при номинальной нагрузке оказывается под номинальным напряжением или близким к нему, а токи в обмотках не превышают номинальный больше, чем на 15—20%. Если нагрузка двигателя невелика и не нужен большой пусковой момент, можно использовать схемы с пусковым активным сопротивлением или пусковым конденсатором. Схема с пусковым конденсатором выгоднее, но сложнее. Если нагрузка составляет 50—100% мощности двигателя при его включении в трехфазную сеть и нужен большой пусковой момент, то используется одна из схем конденсаторного двигателя (с рабочим и пусковым конденсаторами).

В некоторых электроинструментах, например в электрорубанке типа И-24А (мощность электродвигателя 0,26 кВт, напряжение — 220 В, ток — 1,88 А), обмотка статора электродвигателя соединена в звезду и нулевая точка недоступна. Очевидно, как конденсаторный двигатель он может иметь включения по схеме, изображенной на рис. 12, а или рис. 13. Реверс в этом случае не нужен.

Трехфазные асинхронные двигатели, питающиеся от асинхронного или синхронного расщепителя фаз, имеют лучшие пусковые свойства по сравнению с конденсаторными двигателями.

Если электроэнергия идет через пятиамперный электросчетчик типа СО-2, то при напряжении 220 В и наибольшем токе 7,5 А, допустимая мощность, потребляемая от сети, будет 220·7,5=1650 Вт=1,65 кВт, а с учетом к. п. д. и коэффициента мощности полезная мощность составит 0,9—1,27 кВт. Мощность, указанная в паспорте (на щитке двигателя),— это полезная мощность на валу двигателя.

Максимально допустимый ток по условиям нагрева для пятиамперного счетчика равен 12,5 А*. В этом случае предельно допустимая максимальная мощность, потребляемая от сети, будет 220·12,5=2740 Вт=2,74 кВт; с учетом к. п. д. и коэффициента мощности полезная мощность составит 1,6—2,1 кВт. Мощность двигателя 1,7 кВт является, очевидно, предельной при его использовании в быту (при этом все другие потребители электроэнергии должны быть отключены).

Такую же предельную мощность приводит и Н. Д. Торопцев в работе «Применение трехфазного двигателя в схеме однофазного включения с конденсатором». Р. К. Томас в статье «Еще раз о работе трехфазного двигателя в однофазной сети» считает предельную мощность двигателя равной 1,1 кВт. Приведем несколько примеров.

1. Асинхронный трехфазный двигатель: мощность — 0,25 кВт, напряжение — 127/220 В, ток — 2/1,15 А. Напряжение сети — 220 В. Схема включения дана на рис. 13. Схема соединения обмоток статора — звезда.

Рабочая емкость, вычисленная по формуле (36),

$$2800\frac{I_ф}{U_л} = 2800\frac{1,15}{220} = 14,6\ мкФ \approx 15\ мкФ,$$

по формуле (37)

$$\frac{P_н\cdot 10^9}{2\pi f U_н^2} = \frac{0,25\cdot 10^9}{2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 220^2} = 16,4\ мкФ \approx 16\ мкФ,$$

по формуле (38)

$$\frac{1,2P_н\cdot 10^6}{(U_н\cdot\cos\varphi_н)^2\eta_н} = \frac{1,2\cdot 0,25\cdot 10^6}{(220\cdot 0,74)^2 0,73} = 15,5\ мкФ \approx 16\ мкФ.$$

Как видим, формулы (36)—(38) практически равноценны. Окончательное значение емкости уточняется опытным путем. Напряжение на конденсаторе приблизительно равно напряжению сети.

Пусковая емкость, вычисленная по формуле (42),

$$(2,5\div 3)C_p = (2,5\div 3)15 \approx 37\div 45\ мкФ.$$

---

* Нагрузка электросчетчика не должна превышать номинальную более чем: а) в 1,5 раза по правильности учета; б) в 2,5 раза по условиям допустимого нагрева.

2. Двигатель типа АОЛ32-4 : мощность—0,6 кВт, напряжение — 127/220 В, ток — 4,8/2,89 А. Напряжение сети —220 В. Схема включения приведена на рис. 12, в.

Рабочая емкость, вычисленная по формуле (40),

$$2740 \frac{I_н}{U_н} = 2740 \frac{2,8}{220} = 35 \text{ мкФ},$$

по формуле (41)

$$\frac{P_н \cdot 10^9}{8,4 f U_н^2} = \frac{0,6 \cdot 10^9}{8,4 \cdot 50 \cdot 220^2} = 30 \text{ мкФ}.$$

Как видим, значения емкостей конденсаторов разные, но одного порядка и отличаются друг от друга на 14,3%. Окончательное значение емкости уточняется опытным путем. Напряжение на конденсаторах на 15% превышает напряжение сети.

Пусковая емкость

$$(2,5 \div 3)35 = 89 \div 105 \text{ мкФ}.$$

3. Двигатель типа АОЛ32-4 : мощность — 1 кВт, напряжение — 127/220 В, ток — 7,3/4,2 А. Напряжение сети —220 В. Схема включения дана на рис. 12, *в*.

Рабочая емкость

$$2740 \frac{4,2}{220} = 52 \text{ мкФ}, \quad \frac{1,0 \cdot 10^9}{8,4 \cdot 50 \cdot 220^2} = 49,5 \text{ мкФ} \approx 50 \text{ мкФ}.$$

Пусковая емкость

$$(2,5 \div 3)52 = 130 \div 156 \text{ мкФ}.$$

4. Двигатель типа АОЛ41-2: мощность — 1,7 кВт, напряжение — 127/220 В, ток — 10,7/6,2 А. Напряжение сети — 220 В. Схема включения дана на рис. 13.

Рабочая емкость

$$2800 \frac{6,2}{220} = 79 \text{ мкФ} \approx 80 \text{ мкФ},$$

$$\frac{1,7 \cdot 10^9}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 220^2} = 110 \text{ мкФ},$$

$$\frac{1,2 \cdot 1,7 \cdot 10^6}{(220 \cdot 0,87)^2 \cdot 0,82} = 69 \text{ мкФ}.$$

Разброс в определении величины емкости 36,3%. Окончательное значение емкости уточняется опытным путем. Напряжение на емкости приблизительно равно напряжению сети.

Пусковая емкость

$$(2,5 \div 3)80 = 200 \div 240 \text{ мкФ}.$$

5. Двигатель электропилы ВАКООП : мощность — 1,6 кВт, напряжение — 220 В, обмотки статора соединены в звезду, нулевая точка недоступна. Ток — 6,8 А, к. п. д. — 0,76, коэффициент мощности — 0,82; частота вращения — 2820 об/мин; номинальный момент — 0,55 кГм; пусковой момент —1,25 кГм; максимальный момент — 1,52 кГм; пусковой ток — 33 А; кратность пускового тока — 4,9; ротор короткозамкнутый, обмотка ротора медная. Напряжение однофазной сети — 220 В, частота переменного тока — 50 Гц. Схема включения дана на рис. 13.

Рабочая емкость

$$2800 \frac{6,8}{220} = 87 \text{ мкФ},$$

$$\frac{1,6 \cdot 10^9}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 220^2} = 105 \text{ мкФ},$$

$$\frac{1,2 \cdot 1,6 \cdot 10^6}{(220 \cdot 0,82)^2 \cdot 0,76} = 77 \text{ мкФ}.$$

Разброс в определении величины емкости 26,6%.

Пусковая емкость: тяжелые условия пуска

$$(6 \div 8) \cdot 87 = 522 \div 696 \text{ мкФ},$$

нормальные условия пуска

$$(2,5 \div 3) \cdot 87 = 218 \div 260 \text{ мкФ}.$$

Испытания показали, что двигатель без нагрузки пускается в ход с рабочей емкостью 77—105 мкФ (окончательно было выбрано 88 мкФ). Однако пусковой момент мал и не обеспечивает работу пил. При пусковой емкости 320 мкФ и выше двигатель обеспечивает работу пилы, но перегружается по току и сильно нагревается. Пильную цепь часто заедает, поэтому пуски часты. Экономически этот вариант также не оправдывается, так

как стоимость батареи конденсаторов в 4—5 раз превышает стоимость электропилы. Поэтому был выбран вариант с асинхронным расщеплением фаз.

6. Двигатель типа АО 41-6: мощность — 1 кВт, напряжение — 220/380 В, ток — 4,8/2,8 А; к. п. д. — 0,77; коэффициент мощности — 0,72; частота вращения — 980 об/мин; напряжение однофазной сети — 220 В; частота переменного тока — 50 Гц. Обмотка двигателя соединена в треугольник.

В качестве асинхронного расщепителя фаз был использован двигатель от электропилы типа ВАКООП мощностью 1,6 кВт (см. пример 5). Схема включения изображена на рис. 19. Емкость пускового, рабочего и компенсирующего конденсаторов — 88 мкФ. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Номинальный режим соответствует примерно нагрузке на валу двигателя 0,9 кГм. Двигатель хорошо пускается в ход под нагрузкой.

7. Двигатель электропилы типа ВАКООП мощностью 1,6 кВт (см. пример 5). Схема включения изображена на рис. 19. Емкость рабочего и компенсирующего конденсаторов — 88 мкФ (в процессе проведения опытов она изменялась от 0 до127мкФ. Емкость пускового конденсатора — 320 мкФ. В качестве рабочей и компенсационной емкости использовались конденсаторы КБГ-МН, в качестве пусковой — конденсаторы

Таблица 4

Рабочие характеристики двигателя типа А042-6 при его использовании от однофазной сети через асинхронный расшепитель фаз

Момент на валу двигателя, кГм	Полная мощность, потребляемая от сети, кВА	Активная мощность, потребляемая от сети, кВт	Ток, потребляемый от сети, А	К. п. д.	Коэффициент мощности	Степень несимметрии трехфазного напряжения, %
0	0,86	0,45	4	0	0,523	2,16
0,14	1,53	0,55	7	0,364	0,360	3,33
0,35	1,58	0,88	7,2	0,582	0,562	4,3
0,6	1,65	1,08	7,5	0,715	0,656	2,82
0,75	1,76	1,29	8	0,794	0,736	3,81
0,9	1,98	1,54	9	0,834	0,778	5,55
1,05	2,3	1,8	10,5	0,863	0,774	6,25

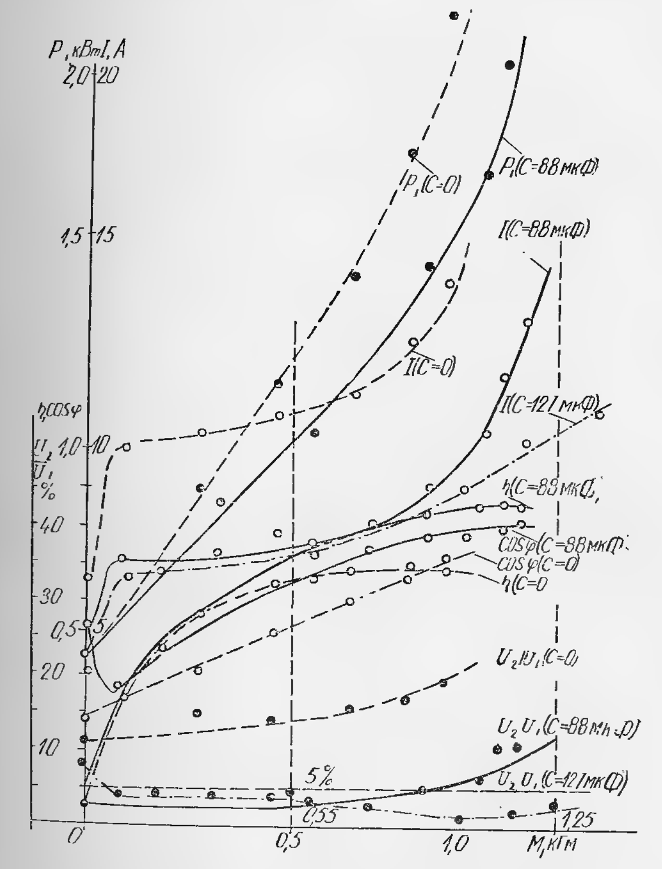


Рис. 23. Характеристики системы «асинхронный расщепитель фаз + асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором равной мощности».

КЭ-2-Н. Характеристики системы «асинхронный расщепитель фаз + асинхронный двигатель равной мощности» в зависимости от момента на валу асинхронного двигателя приведены на рис. 23. Из приведенных зависимостей следует, что при работе асинхронного расщепителя фаз без компенсирующей емкости ($C=0$) от сети потребляется большая мощность, больший ток, а к. п. д. и коэффициент мощности меньше, чем при ис-

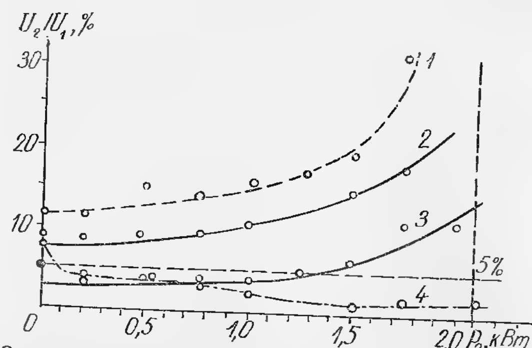


Рис. 24. Зависимость коэффициента асимметрии трехфазного на пряжения асинхронного расщепителя фаз от нагрузки:

1 — 0 мкФ; *2* — 44 мкФ; *3* — 88 мкФ; *4* — 127 мкФ.

пользовании компенсирующей емкости. Коэффициен асимметрии напряжения (отношение напряжения об ратной последовательности к напряжению прямой по следовательности), начиная с режима холостого хода больше 10%, что приводит к перегреву асинхронного двигателя, хотя он и развивает номинальный момент 0,55 кГм; при нагрузке превышающей 1 кГм двигатель останавливается. Поэтому электропила ВАКООП не может работать от асинхронного расщепителя фаз без компенсирующей емкости. При компенсирующей емкости 88 мкФ и нагрузке на валу асинхронного двигателя 0,9 кГм коэффициент асимметрии лежит в допустимых пределах (5%), при нагрузке 1,25 кГм (пусковой момент) коэффициент асимметрии равен 13%. В этом случае также возможен перегрев двигателя; но электропила работает без остановок, вызванных заеданием пильной цепи (пусковой момент достаточен).

При компенсирующей емкости 127 мкФ коэффициент асимметрии трехфазного напряжения асинхронного расщепителя фаз на всем диапазоне нагрузок от холостого хода движения до пускового режима лежит в допустимых пределах (меньше 5%), и только когда асинхронный расщепитель фаз работает вхолостую (без нагрузки) коэффициент асимметрии равен 8%. Из приведенных зависимостей (рис. 24) видно, какую важную роль играет компенсирующая емкость. Если она находится в пределах 88 — 127 мкФ, асинхронный расщепи-

тель фаз пригоден для питания цепной электропилы типа ВАКООП мощностью 1,6 кВт (Ижевский завод). Такой пилой было распилено 30 м³ дров преимущественно хвойной породы. Расход энергии составил 18 кВт-ч, затраты — 72 коп. Коэффициент полезного действия расщепителя фаз при полной нагрузке — 75%. Коэффициент мощности — 0,64. Мощность, потребляемая расщепителем от сети,— 1,5—2,1 кВт, ток—11—13 А. Ток холостого хода расщепителя — 6,7А, мощность холостого хода (потребляемая от сети) — 510 Вт. При напряжении в однофазной сети меньше 190 В (вместо 220 В) пила не работает.

Данный расщепитель фаз опробован для питания дисковой пилы типа С-456, электрорубанка И-25 и электросверла И-27. Асинхронный расщепитель фаз с компенсирующей емкостью прост и надежен в эксплуатации. Он может быть использован, когда невозможно применять однофазный асинхронный конденсаторный двигатель.

В 1960 г. в Ижевском механическом институте на кафедре электротехники инженером Г. А. Мурзыковым под руководством автора был собран асинхронный преобразователь фаз и частоты на основе преобразователя частоты типа И-75Б с некоторыми изменениями. Для пуска в ход от однофазной сети напряжением 220 В использовалась пусковая емкость 210 мкФ. Для увеличения коэффициента мощности и улучшения условий работы использовалась рабочая емкость 140 мкФ. В качестве пусковой емкости использовались электролитические конденсаторы, в качестве рабочих — конденсаторы с бумажной изоляцией. С помощью асинхронного преобразователя числа фаз и частоты от однофазной сети напряжением 220 В частотой 50 Гц питалась трехфазная электропила повышенной частоты типа К-5.

Испытания дали удовлетворительные результаты: ток, потребляемый от однофазной сети асинхронным преобразователем фаз и частоты, при работе электропилы К-5 был равен 13—14А, мощность, потребляемая от однофазной сети,—2,85 кВт, мощность, потребляемая электропилой К-5 от асинхронного преобразователя фаз и частоты,—1,5 кВт, напряжение на электропиле К-5 (линейное) — 225 В, ток, потребляемый электропилой К-5,—

7,5 А, коэффициент полезного действия асинхронного преобразователя числа фаз и частоты — 0,53.

Оригинальная схема умножителя частоты с однофазным входом и трехфазным выходом разработана в 1970 г. в Кишиневском политехническом институте им. С. Лазо В. И. Загрядцким и А. П. Недзельским.

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

По отношению к сети асинхронный двигатель представляет собой активно-индуктивное сопротивление, у которого величина активного сопротивления зависит от скольжения двигателя. Коэффициент мощности изменяется в зависимости от нагрузки двигателя и имеет «отстающий характер». Только конденсаторные двигатели имеют «опережающий характер» коэффициента мощности. Самый низкий коэффициент мощности наблюдается при холостом ходе двигателя. Поэтому для повышения коэффициента мощности стараются избегать длительных режимов холостого хода, выбирают мощность двигателя в строгом соответствии с нагрузкой.

Можно повысить коэффициент мощности асинхронного двигателя или группы двигателей путем подключения конденсаторов, которые своей емкостью и реактивной мощностью компенсируют сдвиг фаз и реактивную мощность, обусловленную двигателями, и таким образом, позволяют повысить коэффициент мощности. Для этого их включают параллельно двигателю. Специальные конденсаторы, с помощью которых повышают коэффициент мощности, называются косинусными, но можно использовать и другие, например МБГЧ. Величина емкости, которую необходимо включить параллельно активно-индуктивной нагрузке (например, асинхронному двигателю), определяется по формуле

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \tag{50}$$

где P — активная мощность, Вт; $\omega = 2\pi f$; f — частота переменного тока, Гц; U — напряжение сети, В; φ_1 — угол между вектором напряжения и вектором тока до повыше-

ния мощности; φ_2 — угол между вектором напряжения и вектором тока после повышения коэффициента мощности; C — необходимая емкость конденсатора, мкФ.

Пример. При напряжении в сети 220 В, частоте 50 Гц и силе тока 1,25 А однофазный электродвигатель холодильника ЗИЛ потребляет мощность 140 Вт. Какой емкости конденсатор нужно включить параллельно двигателю холодильника, чтобы увеличить коэффициент мощности до 0,95? Какова величина тока, потребляемого от сети, после увеличения коэффициента мощности?

Определим коэффициент мощности до его повышения

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{UI} = \frac{140}{220 \cdot 1,25} = 0,51,$$

откуда $\varphi_1 = 59°20$, $\operatorname{tg}\varphi_1 = 1,686$.

Нужно повысить коэффициент мощности до 0,95, значит

$$\cos_2\varphi = 0,95, \quad \varphi_2 = 18°10, \quad \operatorname{tg}\varphi_2 = 0,328.$$

Необходимая емкость конденсатора

$$C = \frac{140}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 220^2}(1,686 - 0,328) = 12,5 \cdot 10^{-6}\ Ф = 12,5\ мкФ.$$

(Найденную величину емкости целесообразно округлить до 12 мкФ — 3 конденсатора по 4 мкФ каждый, соединенные между собой параллельно).

Величина тока после повышения коэффициента мощности

$$I_2 = I_1 \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} = 1,25 \frac{0,51}{0,95} = 0,67\ А,$$

т. е. потребляемый ток уменьшается по абсолютной величине на

$$\frac{1,25 - 0,67}{1,25} \cdot 100 = 46,3\%.$$

Увеличение коэффициента мощности электродвигателей — важная народнохозяйственная задача.

КОНДЕНСАТОРЫ

Для пуска в ход трехфазных двигателей от однофазной сети и повышения коэффициента мощности можно использовать различные типы конденсаторов.

Конденсаторы типа МБГЧ (металло-бумажные герметизированные частотные) предназначены для работы в цепях переменного или пульсирующего тока. Они рассчитаны на окружающую температуру от —60 до +70°С и относительную влажность воздуха до 98%. Изготовляются конденсаторы

на напряжение	150 В	емкостью	2,4 и 10 мкФ;
„	250 В	„	0,5; 1;2; 4 и 10 мкФ;
„	500 В	„	0,25; 0,5; 1,2 и 4 мкФ;
„	750 В	„	0,25; 0,5; 1 и 2 мкФ;
„	1000 В	„	0,25; 0,5 и 1 мкФ.

На частотах 100 и 500 Гц рабочее напряжение соответственно понижается на 25 и 50%. Конденсаторы МБГЧ хорошо использовать как рабочие.

Конденсаторы типа КБГ-МН (конденсаторы бумажные герметические в металлическом прямоугольном корпусе нормальные) предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока в интервале температур от —60 до +70°С при напряжении от 200 до 1500 В и емкости от 0,25 до 10 мкФ.

При работе этих конденсаторов в цепях переменного тока значение допустимого напряжения не должно превышать значений напряжения, приведенных в табл. 5.

Эти конденсаторы могут использоваться как рабочие и пусковые.

Конденсаторы типа МБГП (металло-бумажные герметизированные в корпусе прямоугольной фор-

мы) предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока. При использовании их в цепях переменного тока значение допустимого напряжения также не должно превышать значений напряжения, приведенных в табл. 5.

Таблица 5

Допустимое напряжение на конденсаторе

Напряжение постоянного тока, В	Напряжение переменного тока, В, при емкости конденсатора	
	до 2 мкФ	от 4 до 10 мкФ
400	250	200
600	300	250
1000	400	350
1500	500	

Конденсаторы такого типа можно использовать как рабочие и пусковые.

Бумажные конденсаторы выдерживают в течение 4 часов удвоенное рабочее напряжение, а в течение 10 секунд — утроенное.

Конденсаторы типа ЭП (электролитические пусковые) рассчитаны на окружающую температуру от 40 до +60°C и относительную влажность воздуха до 90% (отклонения емкости ±20%). Они выпускаются на напряжение 175 В емкостью 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 мкФ (допустимо 30 включений в час при длительности одного включения до 3 с) и 100 мкФ (20 включений в час при длительности одного включения до 3 с); на напряжение 300 В емкостью 1,5, 3, 5, 8, 10 мкФ (30 включений в час при длительности одного включения до 3 с) и 15, 20, 30 мкФ (20 включений в час при длительности одного включения до 3 с).

Запись ЭП 300-10 означает, что напряжение конденсатора — 300 В, емкость — 10 мкФ.

При отсутствии конденсаторов типа ЭП можно использовать электролитические конденсаторы постоянно-

Рис. 25. Схема соединения электролитических конденсаторов постоянного тока для включения в цепь переменного тока

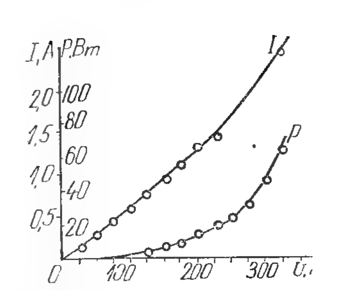


Рис. 26. Зависимость тока, проходящего через конденсатор, и активной мощности, выделяемой в нем, от напряжения переменного тока

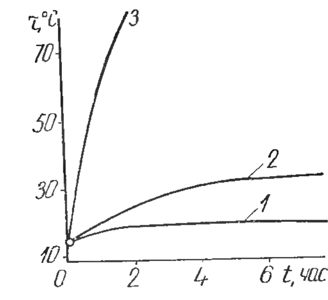


Рис. 27. Тепловые характеристики электролитических конденсаторов, включенных по схеме рис. 25:

1 — напряжение 40 В, перепад температуры 5,5°C, ток 0,2 А, активные потери в конденсаторе примерно равны нулю, постоянная времени нагрева 2,5 часа; 2 — напряжение 85 В, перепад температуры 20,6°C, ток 0,55 А, активные потери в конденсаторе 2,5 Вт, постоянная времени нагрева 1,2 часа; 3 — напряжение 164 В, температура все время растет, ток 1,1 А, активные потери в конденсаторе 10 Вт

го тока типа КЭ-2, включенные по схеме, данной на рис. 25. Два конденсатора, соединенные по такой схеме, представляют собой один электролитический конденсатор переменного тока. Автор использовал такое включение для пуска асинхронных двигателей, когда наша промышленность еще не выпускала электролитических пусковых конденсаторов.

Таблица 6

Электрические характеристики конденсаторов, включенных на напряжение переменного тока частотой 50 Гц

Электрические характеристики конденсаторов постоянного тока			Электрические характеристики двух конденсаторов, соединенных по схеме рис. 25		
Тип	Емкость, мкФ	Напряжение, В	Емкость, мкФ	Длительно допустимое напряжение, В	Кратковременно (до 3с) допустимое напряжение, В
КЭ-2М	40	450	20—25	65—75	380
КЭ-2Н	150	300	75—80	40—50	300

Данные таблицы 6 получены в результате соответствующих испытаний. Зависимость тока, проходящего через конденсаторы КЭ-2М (включенные по схеме рис. 25) и активной мощности, выделяемой в них, от напряжения переменного тока частотой 50 Гц дана на рис. 26.

Как видно из рисунка, при напряжениях переменного тока до 40—75 В выделение активной мощности в конденсаторе невелико, с увеличением напряжения оно резко увеличивается. На рис. 27 показана зависимость температуры конденсатора от времени и напряжения переменного тока промышленной частоты, приложенного к конденсатору.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

В соответствии с «Правилами устройства электроустановок (ПУЭ)» (1965 г.), «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилами техники безопасности (ПТЭ и ПТБ) при эксплуатации электроустановок потребителей» (1971 г.) заземление электроустановок необходимо выполнять при нормальных напряжениях переменного тока выше 36 В в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках. Заземлению подлежат корпуса электрических машин, трансформаторов аппаратов, светильников и т. д.

Запрещается использование земли в качестве фазного или нулевого провода. В цепи нулевых проводов, если они одновременно служат для целей заземления, не должно быть разъединяющих аппаратов и предохранителей, за исключением случаев, предусмотренных ПУЭ.

Каждый заземляемый элемент установки должен быть присоединен к заземлителю или к заземляющей магистрали посредством отдельного ответвления. Последовательное включение в заземляющий проводник нескольких заземляемых частей установки запрещается. Предохранители с плавкими вставками или автоматические включатели защищают электродвигатели от многофазных замыканий. В сетях с заземленной нейтралью должна быть обеспечена защита от замыканий на корпус или нулевой провод. Номинальные токи плавких вставок должны выбираться таким образом, чтобы обеспечивалось надежное отключение короткого замыкания на зажимах электродвигателя или другой аппаратуры. Плавкие вставки предохранителей должны быть калиброваны, применение некалиброванных вставок и предохранителей запрещается.

Вращающиеся и открытые токоведущие части должны быть ограждены с целью исключения случайных прикосновений. Батарею конденсаторов необходимо надежно закрепить, чтобы предупредить ее смещение от возможных вибраций. Конденсаторы с исправной изоляцией после отключения сохраняют заряд и напряжение на своих зажимах в течение длительного времени. Опасность поражения электрическим током при прикосновении к заряженному конденсатору возрастает с увеличением его емкости и напряжения. При ремонте и испытаниях конденсатора после каждого отключения его нужно разрядить или убедиться, что он разряжен. Для саморазряда конденсатор следует зашунтировать разрядным соприкосновением не более 150—200 кОм. В качестве разрядного сопротивления проще всего использовать несколько электрических ламп, соединенных последовательно.

При использовании электролитических конденсаторов следует помнить, что их корпус находится под напряжением и его нужно изолировать. Продолжительность включения пусковых электролитических конденсаторов на номинальное напряжение не должно превышать 3 с. В процессе работы электролитические конденсаторы могут взрываться, поэтому должны быть предусмотрены все меры предосторожности. Сечения проводников, соединяющих электродвигатель с преобразовательным или пуско-регулирующим устройством, должны выбираться с учетом не только нормальных, но и аварийных режимов в соответствии с рекомендациями ПУЭ. Эксплуатироваться должны только исправные установки при наличии защитных средств (диэлектрические перчатки, инструменты с изолированными рукоятками, указатели напряжения). Кроме работающего с электрофицированным инструментом, рядом должен быть еще один человек, знакомый с данной электроустановкой и способный оказывать пострадавшему первую помощь.

Соблюдение правил технической эксплуатации и безопасности обслуживания делает использование трехфазного двигателя от однофазной сети безопасным в различных условиях эксплуатации.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Некоторые данные электродвигателей

Нашей промышленностью выпускаются различные типы асинхронных двигателей.

Универсальный асинхронный двигатель представляет собой двигатель небольшой мощности с короткозамкнутой обмоткой ротора и трехфазной обмоткой статора. Универсальность этого двигателя заключается в том, что он без каких-либо изменений в конструкции может быть использован как трехфазный и как однофазный (выбирается соответствующая обмотка и число пазов статора и ротора, данные приведены в табл. 7).

Исследования профессора Ю. С. Чечета показали, что для удешевления и упрощения производства и эксплуатации двигателей целесообразно использовать одну и ту же машину без изменения конструктивных и обмоточных данных в качестве трехфазных и однофазных. Это возможно с точки зрения технических и энергетических показателей. Однако не все двигатели, выпускаемые промышленностью, отвечают этим условиям.

При использовании универсального асинхронного двигателя в однофазном режиме его мощность по сравнению с трехфазным снижается. В однофазном режиме эти двигатели используются как конденсаторные (схемы включения даны на рис. 12).

Трехфазные асинхронные электродвигатели общего применения закрытого или закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором предназначены для продолжительного режима работы при частоте 50 Гц. Основные данные этих двигателей приведены в табл. 8 и 9. Исследованиями установлено, что только часть электродвигателей серии А может быть непосредственно использована в качестве однофазных, поскольку

Таблица 7

Данные универсальных асинхронных двигателей серии УАД

Тип двигателя	Число фаз	Мощность, Вт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Ток, А	К. п. д.	Коэф. мощности
УАД-54	3	9	127/220	1280	0,17	0,25	0,55
	1	8	220	1300	0,16	0,25	0,88
УАД-64	3	20	127/220	1280	0,23	0,4	0,6
	1	15	220	1300	0,23	0,35	0,85
УАД-74	3	30	127/220	1280	0,3	0,5	0,5
	1	25	220	1300	0,3	0,45	0,85

паразитные моменты (синхронные и асинхронные) от высших гармоник в однофазном варианте двигателя с короткозамкнутым ротором проявляются более резко. В этом случае двигатели должны работать от однофазной сети через асинхронный расщепитель фаз.

Данные *асинхронных двигателей, встраиваемых в электроинструмент,* приведены в табл. 10. Значения коэффициента мощности и коэффициента полезного действия асинхронных трехфазных двигателей с короткозамкнутым ротором типа А и АЛ и их зависимость от нагрузки двигателя указаны в табл. 11.

Обозначения выводов статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей

Если обмотка статора имеет 6 выводов — открытая схема, они обозначаются:

1-я фаза начало — С1, конец — С4,
2-я фаза начало — С2, конец — С5,
3-я фаза начало — С3, конец — С6.

Если обмотка статора имеет 4 вывода — соединение «звездой» с выведенной нулевой точкой, то обозначения следующие:

Таблица 8

Данные трехфазных асинхронных двигателей в закрытом обдуваемом исполнении

Тип двигателя	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	Ток (А) при напряжении			К. п. д.	Коэффициент мощности	Кратность		
			127 В	220 В	380 В			пускового тока	пускового момента	максимального момента
АОЛ-011-4	50	1390	0,85	0,49	0,28	0,43	0,63	3	1,3	1,7
АОЛ-012-4	80	1390	1,1	0,62	0,36	0,52	0,65	3	1,3	1,7
АОЛ-11-4	120	1400	1,35	0,72	0,45	0,58	0,72	4	1,8	2,0
АОЛ-12-4	180	1400	1,8	1,04	0,6	0,62	0,74	4	1,8	2,0
АОЛ-21-4	270	1400	2,48	1,43	0,83	0,66	0,75	4	1,8	2,0
АОЛ-22-4	400	1400	3,41	1,97	1,14	0,70	0,76	4	1,8	2,0
АО и АОЛ-31-4 . . .	600	1410	4,8	2,8	1,6	0,74	0,76	5	1,7	2,0
АО и АОЛ-32-4 . . .	1000	1410	7,3	4,2	2,4	0,785	0,79	5	1,8	2,0
АО и АОЛ-41-4 . . .	1700	1420	11,6	6,7	3,9	0,815	0,82	5	1,8	2,0
АОЛ-011-2	80	2760	0,75	0,43	0,25	0,58	0,84	4	1,8	1,7
АОЛ-012-2	120	2760	1,0	0,59	0,34	0,64	0,84	4	1,3	1,7
АОЛ-11-2	180	2800	1,5	0,86	0,50	0,66	0,85	5	1,3	2,2
АОЛ-12-2	270	2800	2,08	1,2	0,69	0,69	0,85	5	2,0	2,2
АОЛ-21-2	400	2800	2,95	1,7	0,98	0,72	0,85	5	2,0	2,2
АОЛ-22-2	600	2800	4,3	2,48	1,43	0,75	0,85	5	2,0	2,2
АО и АОЛ-31-2 . . .	600	2860	4,2	2,4	1,4	0,76	0,85	6	2,0	2,4
АО и АОЛ-32-2 . . .	1000	2860	6,6	3,8	2,2	0,79	0,86	6,5	2,2	2,6
АО и АОЛ-41-2 . . .	1700	2860	10,7	6,2	3,6	0,815	0,87	6,5	1,8	2,4

Таблица 9

Данные однофазных асинхронных электродвигателей с пусковым сопротивлением в закрытом обдуваемом исполнении

Тип двигателя	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	Ток (А) при напряжении 127 В	220 В	380 В	К. п. д.	Коэф. мощности	Кратность пускового тока	пускового момента	максимального момента
АОЛБ—011-4	18	1370	1,05	0,61	0,35	0,22	0,62	6,5	1,0	1,4
АОЛБ—012-4	30	1390	1,38	0,80	0,46	0,28	0,62	6,5	1,0	1,4
АОЛБ—11-4	50	1420	1,90	1,10	0,65	0,34	0,62	7,5	1,2	1,8
АОЛБ—12-4	80	1420	2,5	1,45	0,85	0,41	0,62	7,5	1,2	1,8
АОЛБ—21-4	120	1420	3,3	1,90	1,10	0,47	0,62	7,5	1,2	1,8
АОЛБ—22-4	180	1420	4,3	2,50	1,45	0,53	0,62	7,5	1,2	1,8
АОЛБ—31-4	270	1440	5,7	3,3	1,9	0,60	0,62	8	1,2	1,9
АОЛБ—32-4	400	1440	7,6	4,4	2,55	0,67	0,62	8	1,2	1,9
АОЛБ—011-2	30	2880	0,85	0,49	0,28	0,41	0,68	8	1,0	1,4
АОЛБ—Л12-2	50	2880	1,18	0,68	0,39	0,48	0,70	8	1,0	1,4
АОЛБ—11-2	80	2890	1,75	1,0	0,66	0,51	0,72	7,5	1,0	2,2
АОЛБ—12-2	120	2890	2,40	1,4	0,80	0,55	0,72	7,5	1,0	2,2
АОЛБ—21-2	180	2890	3,30	1,9	1,10	0,59	0,72	7,5	1,0	2,2
АОЛБ—22-2	270	2890	4,70	2,7	1,50	0,63	0,72	7,5	1,0	2,2
АОЛБ—31-2	400	2920	6,55	3,8	2,15	0,66	0,72	9	1,0	2,2
АОЛБ—32-2	600	2940	9,50	5,5	3,20	0,69	0,72	9	1,0	2,2

Таблица 10

Данные электродвигателей, встраиваемых в электроинструмент (частота 50 Гц)

Тип двигателя	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	Напряжение, В	Ток (А) при напряжении 36 В	220 В	К. п. д.	Коэффициент мощности
АН—33	120	2700	36,220	4,9	0,81	0,55	0,38
АН—41	180	2700		5,6	0,92	0,60	0,50
АН—42	270	2700		7,1	1,2	0,65	0,60
АН—43	400	2800		10,5	1,8	0,69	0,60
АН—51	600	2750		16,7	2,7	0,73	0,56
АН—52	800	2800		21,3	3,3	0,75	0,59
АН—53	1000	2700		23,8	3,9	0,77	0,66

Таблица 11

Зависимость к. п. д. и коэффициента мощности от нагрузки

Тип двигателя	Мощность, кВт	Коэффициент мощности					К. п. д.				
		нагрузка от номинальной мощности, %									
		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
А или АЛ 31—2	1,0	0,5	0,76	0,81	0,86	0,90	0,63	0,77	0,79	0,79	77
А или АЛ 32—2	1,7	0,52	0,70	0,80	0,87	0,91	0,685	0,795	0,825	0,815	0,815
А или АЛ 31—4	0,6	0,42	0,58	0,70	0,76	0,80	0,605	0,690	0,720	0,740	0,700
А или АЛ 32—4	1,0	0,40	0,60	0,72	0,79	0,82	0,585	0,765	0,785	0,785	0,775
А или АЛ 41—4	1,7	0,45	0,6	0,76	0,82	0,85	0,735	0,805	0,825	0,815	0,815
А или АЛ 32—6	0,6	0,36	0,49	0,59	0,69	0,78	0,575	0,685	0,725	0,740	0,715
А или АЛ 91—6	1,0	0,37	0,52	0,64	0,72	0,77	0,690	0,740	0,760	0,770	0,710
А или АЛ 42—6	1,7	0,37	0,52	0,68	0,75	0,79	0,695	0,795	0,815	0,795	0,755

1-я фаза — С1,
2-я фаза — С2,
3-я фаза — С3,
нулевая точка — 0

Обмотка статора имеет 3 вывода — соединение «звездой» (нулевая точка не выведена):

1-я фаза — С1,
2-я фаза — С2,
3-я фаза — С3.

Обмотка статора имеет 3 вывода — соединение «треугольником»:

1-й вывод — С1,
2-й вывод — С2,
3-й вывод — С3.

Маркировка выводов обмотки двигателя

Проверка правильности маркировки (обозначения) начала и конца обмотки каждой фазы делается следующим образом. С помощью контрольной лампы или вольтметра и напряжения сети определяются фазы обмотки и делаются соответствующие пометки: 1-я, 2-я, 3-я. Чтобы найти конец каждой фазы, две обмотки двигателя соединяют последовательно и подключают к источнику переменного тока напряжением 20—30 В и частотой 50 Гц. Третью обмотку присоединяют к вольтметру переменного тока (или лампочке). Если показания вольтметра равны нулю (лампочка не горит), то подключенные к источнику питания обмотки соединены одноименными выводами, т. е. началами (С1 и С2) или концами (С4 и С5). Соединенные последовательно обмотки отключают от источника питания и маркируют условно. Затем одну из маркированных обмоток соединяют с третьей обмоткой и подключают к источнику питания, а вторую маркированную обмотку присоединяют к вольтметру (или лампочке). Если показания вольтметра равны нулю (лампочка не горит), то подключенные к источнику питания обмотки соединены одноименными выводами (началами или концами). Таким образом, определяют условно начало и конец третьей обмотки. Если показания вольтметра отличны от нуля (лампочка горит), то обмотки присоединены к источнику питания разноименными выводами и условная маркировка будет соответственно другой. Выводы обмоток снабжаются соответствующими бирками или выводятся на щиток двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

Андрианов В. Н. Электрические машины и аппараты. М., «Колос», 1971.

Адаменко А. И. Однофазные конденсаторные двигатели. Киев, Изд-во АН УССР, 1960.

Адаменко А. И. Несимметричные асинхронные машины. Киев, Изд-во АН УССР, 1962.

Адаменко А. И. Способ включения трехфазного двигателя в однофазную сеть. Авт. свид. № 128074, 1959.— «Бюл.», 1960, № 9.

Бабат Г. И. Электричество работает. М.—Л., «Энергия», 1964.

Балдас А. М., Голдовский Е. М. Конденсаторный реактивный двигатель. — «Электричество», 1936, № 18.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я., Шнейберг Я. А. История техники. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954.

Blondet M. La locomotive CC 6052 a moteurs directs 50Hz, Revue General des Chemins de fer, Mars, 1953.

Вейтков Ф. Летопись электричества. М.—Л., Изд-во ЦК ВЛКСМ, 1941.

Веселовский О. Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.

Виноградов Н. В. Как самому рассчитать и сделать электродвигатель. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.

Гинзбург М. Д. Электродвигатели для магнитофонов. М.- Л., «Энергия», 1964.

Городский Д. А. Теория однофазных конденсаторных двигателей. Изв. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, вып. 619, 1957.

Гордеев Д. И. Электрооборудование электровозов переменного тока. М., Трансжелдориздат, 1938.

Gordon F. Tracy, Walther E. Wyss, spilt phase Startind ar 3 Phase Motors, Electrical Enginering, October, 1935.

Гусев С. А. Очерки по истории развития электрических машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1955.

Горохов Н. В., Ионкин П. А. Электрические цепи с сосредоточенными постоянными и взаимной индуктивностью.— «Электричество», 1936. № 22.

Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. М. — Л., Госэнергоиздат, 1959.

Von Dr. Sachs. Ulter einige Schaltungsmoglicheiten rotierender und statischer Pasenspalter, Electrotechnien Vereines in Wien, Heft 20, Mai. 1923.

Золотарев П. А., Козорезов М. А., Ситник Н. Х. Привод вспомогательных механизмов электровозов переменного тока.— «Вестник электропромышленности», 1959, № 2.

Загрядцкий В. И. Совмещенные электрические машины. Кишинев, изд-во «Картя Молдовеняскэ», 1971.

Загрядцкий В. И., Кобыляцкий Н. Н., Недзельский А. П. Ферромагнитные умножители частоты с вращающимся магнитным полем. Кишинев, изд-во «Картя Молдовеняскэ», 1973.

Загрядцкий В. И., Недзельский А. П. Статистический преобразователь однофазного напряжения в многофазное. Авт. свид. № 355676.— «Бюл.», 1972, № 31.

Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины. М., ГЭИ, 1957.

Кузнецов Б. Г. Очерки истории электротехники. М.—Л., ОНТИ, 1936.

Кузнецов Б. Г. История энергетической техники. М.—Л., ОНТИ, НКТП, 1937.

Кузнецов М. И. Основы электротехники. М., Профтехиздат, 1960.

Кацман М. М. Электрические машины и трансформаторы. М., «Высшая школа», 1971.

Коварский Е. М. Ремонт электрических машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.

Козорезов М. А. Асинхронный расщепитель фаз.— «Электропромышленность и приборостроение», 1960, № 20.

Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины, ч. II. Машины переменного тока, изд. 2-е. М.—Л., «Энергия»,

Круг К. А. Бесколлекторные асинхронные двигатели, изд. 2-е, переработ. Л., «Кубуч», 1928.

Лопухина Е. М., Сомихина Г. С. Расчеты асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.

Лопухина Е. М., Сомихина Г. С. Электрические машины с полым ротором. М., ЦБТИ, 1959.

Лопухина Е. М., Сомихина Г. С. Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.

Maggs. Singe-Phase to Fhree cowersion by the Ferraris-Arno System, IIEE, vol. 93. Port 11, 1946.

Марковский Ф. Т., Трегуб А. П. Общая электротехника. М.—Л., Машгиз, 1963.

Меркин Г. Б. Конденсаторные электродвигатели для промышленности и транспорта. М.—Л., «Энергия», 1966.

Меркин Г. Б. Расчет конденсаторных асинхронных двигателей. Известия вузов.— «Электромеханика», 1958, № 5.

Мишин В. И. Статистические нелинейные цепи с вращающимся магнитным полем. Кишинев, изд-во «Штиинца», 1973.

Микроэлектродвигатель для систем автоматики. Под ред. Э. А. Лодочникова, Ф. М. Юферова. М., «Энергия», 1969.

Пацюра П. П., Руденко Н. Ф. Электропилы для лесозаготовок, изд. 2-е, переработ. М.—Л., Гослесбумиздат, 1958.

Петров Г. Н. Электрические машины, ч. II. Асинхронные и синхронные машины. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

Постников И. М., Адаменко А. И. Работа трехфазных двигателей от однофазной сети.— «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 1958, № 4.

Письмо ЦК КПСС о рациональном использовании электрической энергии в народном хозяйстве от 25 января 1959 г. «Правда», № 330(15089), 1959, 26 января.

Поцелуев В. Работа трехфазного электродвигателя в однофазной сети.— «Радио», 1970, № 11.

Правила устройства электроустановок, изд. 4-е. М.—Л., «Энергия», 1969.

Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей, изд. 3-е. М., «Атомиздат», 1971.

Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. М., Госэнергоиздат, 1959.

Ржонсницкий Б., Никола Тесла. М., «Молодая гвардия», 1959.

Сазонов Н. А. Руководство для сельского электромонтера. М., Сельхозиздат, 1956.

Сало В. Д. Выбор и исследование электропривода полевого зерноочистительного тока при однофазном питании. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Киев, 1959.

Ситник Н. Х. Преобразователь однофазного тока в трехфазный. Авт. свид. № 128532, 1958.— «Бюл.», 1960, № 10.

Ситник Н. Х. Метод расчета и параметры асинхронного расщепителя фаз. Известия вузов.— «Электромеханика», 1958, № 3.

Справочник электрика промышленных предприятий. Минск, Госиздат БССР, 1963.

Томас Р. К. Еще раз о работе трехфазного двигателя в однофазной сети.— «Радио», 1972, № 2.

Торопцев Н. Д. Применение трехфазного асинхронного двигателя в схеме однофазного включения с конденсатором. М.—Л., «Энергия», 1970.

Торопцев Н. Д. Бесконтактное устройство для автоматического управления однофазным асинхронным двигателем. Авт. свид. № 107711, 1956.— «Бюл.», 1957, № 7.

Третьяков М. Н. Испытание электродвигателей малой мощности. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

Фурсов С. П. Предложение об использовании электролитических конденсаторов постоянного тока для пуска асинхронных двигателей.— «Радио», 1959, № 3.

Фурсов С. П. Асинхронный расщепитель фаз для питания трехфазного электроинструмента от однофазной сети.— «Бюллетень технико-экономической информации». Ижевск, 1953, № 3.

Чечет Ю. С. Расчет вспомогательной обмотки однофазных асинхронных микродвигателей.— «Электричество», 1949, № 2.

Чечет Ю. С. Номографический метод построения рабочих характеристик однофазных асинхронных микродвигателей с расщепленной фазой.— «Электричество», 1948, № 7.

Чечет Ю. С. Электрические микромашины.— «Электричество», 1955, № 8.

Чечет Ю. С. Универсальный асинхронный микродвигатель.— «Электричество», 1950, № 10.

Чечет Ю. С. Электрические микромашины автоматических устройств. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.

Яковлев Д. В., Сидоров Н. И. Устройство, ремонт и эксплуатация электровозов переменного тока. М., изд-во «Высшая школа», 1972.

СОДЕРЖАНИЕ

Сергей Петрович Фурсов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В БЫТУ

Редактор В. Фрунзе.
Художественный редактор Л. Кирпяк.
Технический редактор Д. Шехтер.
Корректор Н. Олейникова.